

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



**PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN DE CONSUMO DE COMBUSTIBLE
EN LAS RUTAS DE TRANSPORTE TERRESTRE DE MERCANCÍAS**

POR

JOSÉ ROBERTO VÁSQUEZ RUIZ

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN LOGÍSTICA Y CADENA DE SUMINISTRO**

ENERO 2017

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN DE CONSUMO DE
COMBUSTIBLE EN LAS RUTAS DE TRANSPORTE TERRESTRE
DE MERCANCÍAS**

POR

JOSÉ ROBERTO VÁSQUEZ RUIZ

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN LOGÍSTICA Y CADENA DE SUMINISTRO**

ENERO, 2017

Universidad Autónoma de Nuevo León

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Subdirección de Estudios de Posgrado

Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la Tesis «Problema de optimización de consumo de combustible en las rutas de transporte terrestre de mercancías», realizada por el alumno José Roberto Vásquez Ruiz, con número de matrícula 1770344, sea aceptada para su defensa como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Logística y Cadena de Suministro.

El Comité de Tesis



Dr. Omar Jorge Ibarra Rojas

Asesor



Dra. Edith Lucero Ozuna Espinosa

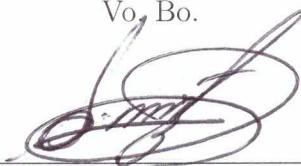
Revisor



Dr. Leonardo Gabriel Hernández Landa

Revisor

Vo. Bo.



Dr. Simón Martínez Martínez

Subdirector de Estudios de Posgrado

San Nicolás de los Garza, Nuevo León, enero 2017

DEDICATORIA

*Agradezco la confianza y el apoyo
brindado por parte de mi madre, que
sin duda alguna en el trayecto de mi vida
me ha demostrado su amor, corrigiendo
mis faltas y celebrando mis triunfos.*

Gracias Mamá

ÍNDICE GENERAL

Agradecimientos	ix
Resumen	x
1. Introducción	1
1.1. Definición del problema	5
1.2. Objetivos	7
1.2.1. Objetivo general	7
1.2.2. Objetivos específicos	7
1.3. Justificación	8
1.4. Hipótesis	8
1.5. Metodología	9
1.6. Estructura de tesis	10
2. Marco teórico	11
2.1. Introducción al problema de ruteo de Vehículos (VRP)	11

2.2. Antecedentes del VRP que consideran la reducción en el consumo de combustible	14
2.3. Factores de que afectan el consumo de combustible en el problema de ruteo de vehículos	19
2.4. Métodos Solución	24
2.4.1. Métodos Exactos	24
2.4.2. Métodos Aproximados	25
2.5. Optimización Multiobjetivo	27
2.5.1. Clasificación de los métodos de solución de modelos matemáticos multiobjetivo	30
3. Modelo	32
3.1. Modelo Bi-objective Pollution Routing Problem	32
3.2. Adaptación del Modelo Bi-objective Pollution Routing Problem . . .	33
4. Experimentación	37
4.1. Etapas de análisis del Efficient Pollution Routing Problem (EPRP) .	37
4.1.1. Primera fase de experimentación	37
4.1.2. Segunda fase de experimentación	40
4.1.3. Tercera fase de experimentación	40
5. Conclusiones	54

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1. Emisiones de Dióxido de Carbono (CO_2) a Nivel Mundial por Sector en 2013.	4
2.1. Factores que afectan el consumo de combustible.	20
2.2. Frontera eficiente de optimización.	28
2.3. Clasificación de métodos solución multiobjetivo.	30
4.1. Resultados del EPRP en la instancia real, primera solución	43
4.2. Resultados del EPRP en la instancia real, segunda solución	45
4.3. Resultados del EPRP en la instancia real, tercera solución	47
4.4. Resultados del EPRP en la instancia real, cuarta solución	49
4.5. Resultados del EPRP en la instancia real, quinta solución	51
4.6. Resultados del EPRP en la instancia real, sexta solución	53

ÍNDICE DE TABLAS

3.1. Parámetros del Problema.	36
4.1. Resultados para instancias de 50 nodos	38
4.2. Resultados para instancias de 75 nodos	39
4.3. Resultados para instancias de 100 nodos	39
4.4. Resultados de comparación entre supuestos de EPRP y Demir et al. para instancias de 50 nodos	41

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis profesores por el apoyo y conocimiento que me compartieron a lo largo de estos dos años, a CONACYT por otorgarme una beca para poder realizar mis estudios de posgrado, a FIME y a la UANL por el apoyo brindado, y en especial a mis tutores de tesis, quienes me guiaron y orientaron al largo de este proyecto.

RESUMEN

José Roberto Vásquez Ruiz.

Candidato para obtener el grado de Maestría en Logística y Cadena de Suministro.

Universidad Autónoma de Nuevo León.

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.

Título del estudio: PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN DE CONSUMO DE COMBUSTIBLE
EN LAS RUTAS DE TRANSPORTE TERRESTRE DE MERCANCÍAS.

Número de páginas: 61.

OBJETIVOS Y MÉTODO DE ESTUDIO: Aquí debes poner tus objetivos y métodos de estudio. (Este es el formato).

CONTRIBUCIONES Y CONCLUSIONES: Y aquí tus contribuciones y conclusiones. (También es parte del formato).

Firma del asesor: _____
Dr. Omar Jorge Ibarra Rojas

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

La logística es la gestión integrada de todas las actividades necesarias para mover los productos a través de la cadena de suministro. Para la mayoría de los productos de una cadena de suministro, el proceso abarca desde la adquisición de materia prima de los proveedores, se incluyen las actividades a través del sistema de producción, la distribución del producto terminado hasta el punto de consumo y la logística inversa asociada.

Las principales actividades logísticas comprenden transporte de mercancías, almacenaje, gestión de inventarios, manejo de materiales y todo lo relacionado procesamiento de información. El principal objetivo de la logística es coordinar estas actividades de manera que se cumpla con los requisitos del cliente a un costo mínimo. Uno de los procesos en el que la eficiencia logística participa activamente es el transporte de mercancías, esta actividad es vital para mantener activo el flujo de bienes y servicios a lo largo de la cadena de suministro, pero consecuentemente también es una de las actividades que representa mayores costos para una organización.

Según datos del Council of Supply Chain Management Professionals [1], el transporte de productos hasta el cliente final por lo general representa entre el 10 y el 20 % del valor final del producto vendido.

En el pasado, la actividad de transporte solo buscaba que las actividades se

realizaran de forma que fueran lo menos costosas posibles. Sin embargo, hoy en día, para toda organización cuyo rubro sea el transporte u esté relacionada con esta área, y que a la par quiera ser competitiva y ofrecer un buen nivel de servicio, debe considerar otros objetivos paralelamente además de costos bajos, como tiempos de entrega cortos, flexibilidad en la operación, flotas de vehículos con mejor eficiencia energética, y una estrategia de responsabilidad para con el medio ambiente.

Actualmente la logística de distribución en las empresas busca tener rutas eficientes que les permitan optimizar el consumo de recursos y minimizar el impacto ambiental de dicha operación, este punto es muy importante dentro de la gestión de una cadena de suministro verde. La Gestión de la Cadena de Suministro Verde (GrSCM) trata de minimizar los impactos ambientales indeseables de los procesos de la cadena de suministro dentro de las organizaciones participantes y a lo largo de toda la cadena de suministro. Srivastava [2] en 2007 define la GrSCM como «la integración de los conceptos medioambientales en la gestión de la cadena de suministro, incluyendo el diseño del producto, el abastecimiento y selección de materiales, procesos de fabricación, entrega del producto final a los consumidores, así como la gestión del fin de la vida útil de los productos».

En años recientes, las actividades verdes se han vuelto parte muy importante dentro de la logística de los sistemas de transporte modernos, múltiples desarrollos tecnológicos y mejoras en el proceso de planeación han redituado en mejoras en los costos, eficiencia y fiabilidad del transporte.

Uno de los puntos más importantes que abordaremos en esta investigación es lo relacionado con la entrega del producto final a los consumidores. Como podemos observar, un eficiente proceso de transporte no solo es necesario por cuestiones económicas sino también por consideraciones ambientales como ya se mencionó anteriormente. Este aspecto cada vez toma mayor fuerza en las empresas, principalmente en aquellas que buscan adoptar un sistema de transporte verde, lo que les permite alinear sus operaciones con respecto a sus políticas de sustentabilidad y mejorar su

imagen corporativa.

El transporte de mercancías por vía terrestre es esencial para el desarrollo económico, este permite a las empresas llevar sus productos hasta donde se encuentran sus clientes y así dar flujo a la cadena de suministro. La planificación de las actividades que involucra el transporte de mercancías se ha centrado principalmente en la minimización de las distancias de recorrido y por ende la reducción de los costos de las rutas de distribución. No obstante, esta perspectiva ha ido cambiando poco a poco debido a la creciente preocupación mundial por el medio ambiente, por lo que cada vez más empresas, proveedores logísticos, y transportistas de carga han comenzado a prestar más atención a los efectos negativos que trae consigo el incremento en la cantidad de transporte que utilizan para cubrir todas sus operaciones de comercio. Algunos de estos efectos son la contaminación, el aumento de accidentes, el aumento de ruido, el consumo de recursos, el deterioro de los suelos y el calentamiento global.

En los niveles locales y regionales, una parte importante del transporte de carga se realiza mediante camiones, los cuales emiten una gran cantidad de contaminantes debido a que su consumo de combustible se ve afectado no solo por las distancias de recorrido que tienen que cumplir dentro de sus rutas de trabajo, sino que también se ve afectado por otros factores como el tipo de vehículo, la velocidad, la carga, la operación del vehículo, las condiciones del camino y el tráfico de presente en las rutas.

Según datos de 2013 del Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) [3], los principales gases de efecto invernadero que contribuyen al calentamiento global son el dióxido de carbono, metano, óxido nitroso y otros gases como los gases fluorados. De estos gases de efecto invernadero, el dióxido de carbono o CO_2 es el gas que mas se emite a la atmosfera por la actividad humana, principalmente como consecuencia de todas aquellas operaciones que conllevan el uso de hidrocarburos como combustible. En la figura 1 podemos observar las emisiones anuales de CO_2 por sector según la International Energy Agency (IEA) [4].

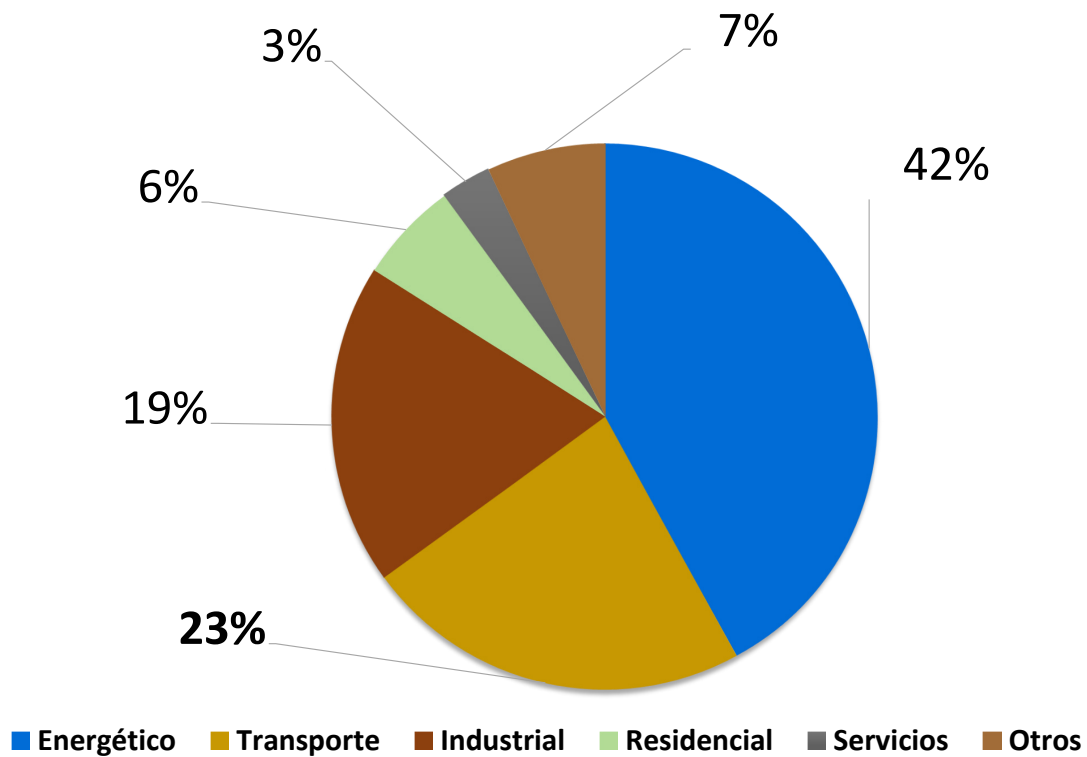


Figura 1.1: Emisiones de Dióxido de Carbono (CO_2) a Nivel Mundial por Sector en 2013.

Como se puede apreciar en la figura 1.1, los dos sectores que mas emisiones de CO_2 tienen hacia el medio ambiente son el sector energía y el sector transporte. Este estudio buscará generar alternativas medioambientales para el sector transporte debido a que actualmente el 95 % de este sector se mueve con derivados del petróleo y solo el porcentaje restante con gas natural y otros energías renovables.

Según Toth y Vigo [5], la planeación y administración adecuada del proceso de transporte puede generar ahorros de entre 5 y 20 % de los costos asociados al transporte, lo cual nos permite visualizar como el reducir los impactos al medio ambiente tambien impacta en la reducción de los costos operativos.

En base a lo anterior podemos entender el contexto verde bajo el cual se trabaja y por qué se buscan generar rutas alternativas para el transporte terrestre de

mercancías. Para esto nos apoyamos en los conceptos de optimización de operaciones relacionados con la modelación matemática que nos permita reducir la cantidad de recursos utilizados para la distribución de productos y que como consecuencia se minimice también el impacto ambiental provocado por la combustión de combustibles fósiles.

A lo largo de este trabajo, también se mostrarán algunos de los trabajos previos que describen como fue abordado el problema de consumo de combustible en las rutas de distribución, cuáles fueron los elementos que se consideraron para su análisis, como fue que enfrentaron la problemática, el tipo de solución que fue empleada, así como los resultados y cuál es su aporte con respecto a la forma tradicional de planificar la distribución de mercancías. También se describirán cuáles son las áreas de oportunidad que encontraron estos trabajos y como pueden convertirse en parte del trabajo a futuro de esta área de optimización. Finalmente, se pretende crear un método de trabajo que apoye la creación valor para el sistema de transporte terrestre de mercancías, manteniendo equilibrada la balanza entre eficiencia en el uso de recursos y eficiencia en costos asociados a la operación, todo esto bajo un enfoque de cuidado del medio ambiente.

1.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Uno de los problemas más complejos y estudiados en el dominio del transporte de mercancías vía terrestre es la planificación de rutas para la distribución de las mismas. El problema de la planificación de las rutas de transporte o Vehicle Routing Problem (VRP) es uno de los problemas de optimización combinatoria más importantes y ampliamente estudiados, con muchas aplicaciones del mundo real, en la logística de distribución y del transporte.

El objetivo de este problema clásico trata de minimizar la distancia total recorrida por un conjunto de vehículos ubicados en un almacén central, para satisfacer la

demanda de un determinado conjunto de clientes. Cada cliente tiene una demanda conocida y cada vehículo sirve una única ruta durante el periodo de planificación, teniendo ésta que comenzar y finalizar en el almacén central. En la literatura existente se han propuesto diferentes versiones del problema VRP clásico con el fin de acercarse a los contextos reales de los diferentes problemas que necesitan ser resueltos dependiendo del objetivo planteado.

Actualmente un modelo Green-VRP no solo tiene por objeto reducir al mínimo las distancias y la cantidad de vehículos totales asignados, sino que también permite reducir el impacto ambiental, al reducir la cantidad de combustible utilizado y por consecuencia las emisiones de CO_2 del transporte por terrestre.

El transporte de mercancías por carretera es un importante contribuyente de emisiones de dióxido de carbono. En determinados contextos esto se debe principalmente al gran consumo de combustible por parte de los vehículos que cubren una ruta de distribución de algún producto, la cual en la mayoría de los casos no toma en cuenta aquellos factores relacionados con la operación que aumentan el consumo de combustible. Por esta razón, para tener rutas eficientes en cuanto a consumo de recursos, la planificación no solo debe incluir como factor de decisión las distancias de recorrido, sino también los factores que afectan el consumo de combustible (características del vehículo, condiciones del medio ambiente, tráfico, estilo de manejo de los conductores y características de la operación de transporte) para así evaluar rutas alternas que cuiden los recursos utilizados y a la vez reduzcan el impacto ambiental.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar una herramienta para la toma de decisiones que mejore la eficiencia del proceso de distribución mediante la reducción de costos y emisiones contaminantes.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desarrollar un análisis del estado del arte de los trabajos previos a esta investigación sobre el problema de consumo de combustible en las rutas de transporte terrestre de mercancías.
- Estudio de los factores que afectan el consumo de combustible dentro de la planeación de rutas de transporte terrestre de mercancías.
- Desarrollo de un modelo para la planificación del ruteo de vehículos que integre los objetivos de reducir los costos de operación y reducir los impactos ambientales debido al uso de combustibles fósiles.
- Evaluación y selección de un método solución que permita tener una solución eficiente tanto en tiempo de solución como en nivel de exactitud.
- Análisis de las conclusiones obtenidas en este trabajo, resaltando los beneficios obtenidos y las áreas de oportunidad para esta y futuras investigaciones del tema.

1.3 JUSTIFICACIÓN

Hoy en día, existe una gran cantidad de modelos que atacan el problema de ruteo de vehículos que centran su objetivo en la reducción de costos. Actualmente surge la necesidad de conocer los enfoques de los modelos de optimización de consumo de combustible existentes para desarrollar un modelo que integre más características del sistema real, el cual permita proponer rutas alternativas para el proceso de operación del transporte de mercancías vía terrestre.

Actualmente en México no existe alguna ley u organismo que regule las emisiones contaminantes a las empresas que utilizan transporte terrestre, lo que si existe son programas de carácter voluntario para generar reportes anuales de las emisiones que una empresa tuvo en su operación. Otros incentivos que apoyan este enfoque verde dentro de las organizaciones son los reconocimientos (certificados de industria limpia, excelencia ambiental y transporte limpio) que se les entregan a aquellas empresas comprometidas con el cuidado del medio ambiente y la implementación de las mejores prácticas en sus actividades.

Este proyecto, al igual que algunos trabajos previos, busca integrar el concepto verde en estos modelos mediante la optimización del consumo de combustible, a la par de la reducción de costos operativos, para así garantizar una eficiencia en costos, uso de recursos e impactos en el medio ambiente.

1.4 HIPÓTESIS

Un modelo de optimización de consumo de combustible que integre más variables y criterios de decisión puede ofrecer rutas alternativas para el transporte de mercancías que garanticen un mejor equilibrio entre los costos de operación, el uso de recursos, y el impacto en el medio ambiente.

1.5 METODOLOGÍA

Para lograr el objetivo de este proyecto, se trabajará bajo la siguiente metodología, con la cual se pretende obtener información relevante que aporte conclusiones significativas a el campo de investigación del problema de consumo de combustible en las rutas de transporte terrestre de mercancías.

- Definición del Problema: Delimitación de las características del problema de ruteo verde que serán tomadas en cuenta en este trabajo, alcances y objetivos.

- Revisión de Literatura: En esta etapa se recabará información sobre el problema básico de ruteo de vehículos (VRP), así como información de su variante de estudio para este trabajo, el VRP Verde y las diversas aplicaciones que ha tenido en la actualidad en diversos entornos relacionados con consumo de combustible en el transporte terrestre de mercancías. También se analizarán algunos casos de estudio previos en los cuales se hayan aplicado metodologías similares.

- Desarrollo del Modelo: Para este punto, con apoyo de la información disponible de otros autores se desarrollará un modelo matemático que considere todas características del problema que se estudiará en este proyecto, principalmente los relacionados a la carga que transportan los vehículos y como afectan su consumo de combustible.

- Elección de herramienta solución: En esta etapa se buscará información sobre los métodos exactos y los métodos aproximados que existen para solucionar este tipo de VRP Verde, se evaluara su eficiencia y se elegirá el que permita obtener resultados más reales y en un tiempo razonable.

- Experimentación: Con el modelo desarrollado y la herramienta de solución seleccionada, se realizarán varias corridas del mismo para así poder obtener información del comportamiento del problema bajo diversos escenarios.

- Resultados: Con la información obtenida se podrá evaluar qué tan eficiente es el modelo desarrollado para la solución del problema estudiado con respecto a la solución del problema por un VRP clásico. Con esta información también se podrán realizar modificaciones al modelo para mejorar los resultados o comprender que otros factores deberían ser considerados para su análisis. Se presentarán los resultados obtenidos, que tan eficiente fue el modelo matemático desarrollado, las limitaciones encontradas y las áreas de oportunidad que pueden existir para continuar con la investigación dentro del trabajo a futuro.

1.6 ESTRUCTURA DE TESIS

Este trabajo está compuesto por 5 capítulos en los cuales se muestra como fue desarrollado este proyecto. En primer capítulo contiene una breve introducción al tema, objetivos, y justificación del proyecto, en el capítulo dos se muestra el estado del arte del tema que estamos trabajando. En los capítulos tres y cuatro se describe el modelo desarrollado y la experimentación que se llevó a cabo con el mismo respectivamente, y finalmente en el capítulo cinco se podrán encontrar las conclusiones a las cuales llego este proyecto.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 INTRODUCCIÓN AL PROBLEMA DE RUTEO DE VEHÍCULOS (VRP)

El problema de reducir el consumo de combustible en los problemas de ruteo de vehículos (VRP) puede ser abordado desde dos enfoques, primeramente, están los modelos de estimación de consumo de combustible en los cuales se emplean diversas herramientas estadísticas para teorizar sobre este parámetro, después tenemos los modelos de optimización de consumo de combustible que mediante herramientas matemáticas buscan minimizar dicho consumo tomando en cuenta los factores que afectan al problema. El contexto de trabajo de este proyecto está enfocado a los modelos de optimización de consumo de combustible.

Para Laporte [6] el VRP consiste en el diseño de las rutas de entrega o de recolección óptimas para un conjunto de vehículos de un depósito central para un conjunto de clientes geográficamente dispersos, sujeto a diversas limitaciones, tales como la capacidad del vehículo, longitud de la ruta, ventanas de tiempo, las relaciones de precedencia entre los clientes, etc. Uno de los primeros artículos sobre el tema fue abordado por Dantzig y Ramser [7] cuando estudiaron su aplicación real en la distribución de gasolina para estaciones de combustible. Por lo general la función

objetivo depende de la tipología y características del problema. Lo más habitual es intentar: minimizar el costo total de operación, minimizar el tiempo total de transporte, minimizar la distancia total recorrida, minimizar el tiempo de espera, maximizar el beneficio, maximizar el servicio al cliente, minimizar la utilización de vehículos, equilibrar la utilización de los recursos, etc. Bajo este enfoque el VRP surge naturalmente como un problema central en los campos de transporte, la distribución y la logística.

La versión estándar de la mayoría de los VRP es el Problema de ruteo de vehículos capacitado (CVRP), se puede describir según Cordeau [8] de la siguiente forma. Sea $G = (N, A)$ un grafo completo no dirigido con un conjunto de nodos $N = \{0, 1, 2, \dots, n\}$, donde cada nodo $i \in N \setminus \{0\}$ representa un cliente que tiene una demanda q_i no negativa, mientras que el nodo 0 corresponde a el depósito. Cada arco $(i, j) \in A = \{i, j : i, j \in N, i \neq j\}$ se asocia a una distancia d_{ij} , además existe una flota de vehículos idénticos m , cada uno con capacidad Q , que está disponible en el depósito.

El CVRP exige la determinación de un conjunto de rutas m cuya distancia total se reduzca al mínimo tal que: (i) cada cliente pertenezca a exactamente una ruta, (ii) cada ruta inicie y termine en el depósito, (iii) la demanda total de los clientes atendidos no exceda la capacidad Q de los vehículos.

Otra variante segun Toth y Vigo [5] es el VRP con carga en los viajes de regreso (VRPB) en el cual el conjunto de clientes se divide en dos subgrupos. El primer subconjunto B_1 , contiene n_b clientes con pedidos, cada uno requiere una determinada cantidad de producto a ser entregado. El segundo subconjunto, B_2 , contiene $n - n_b$ clientes de retorno, en los que una determinada cantidad de producto debe ser recogido. Los clientes están numerados de manera que $B_1 = (1, \dots, n_b)$ y $B_2 = (n_{b+1}, \dots, n)$. El VRPB, adicionalmente a las restricciones básicas del CVRP toma en cuenta que las demandas totales de los clientes con pedidos de entrega y de retorno visitados en cada ruta no excedan la capacidad del vehículo Q , y que todos

los clientes con pedidos de entrega deben preceder a los clientes con retornos en cada ruta de ser posible.

Toth y Vigo [5] también han analizado los VRP con recogidas y entregas (VRPPD), en el cual una serie de productos necesitan ser recogidos de determinadas localizaciones para ser entregados en otras. Cada cliente $i \in N \setminus \{0\}$ se asocia con dos cantidades q_i y p_i , que representa la demanda de un solo producto a entregar y recoger a partir del cliente i , respectivamente. Para cada cliente $i \in N \setminus \{0\}$, O_i denota el nodo correspondiente al origen de la entrega, y D_i denota el nodo correspondiente al destino de la demanda asociada. El objetivo es encontrar rutas óptimas para una flota de vehículos que realizan visitas a los clientes para hacer recolecciones y entregas.

Una extensión importante del VRP, es el problema de enrutamiento de vehículos con ventanas de tiempo (VRPTW), el cual ha sido estudiado ampliamente por Cordeau [8], y por Toth y Vigo [5]. En este problema, cada cliente debe ser servido dentro de intervalos de tiempo predefinidos. Además de las características antes mencionadas del CVRP, este problema incluye, por el depósito y para cada cliente i ($i \in N_0$), una ventana de tiempo $[a_i, b_i]$ durante la cual este cliente tiene que ser servido. Por otra parte, a_0 denota el tiempo de inicio más temprano y b_0 indica la última vez de regreso al depósito para cada vehículo. Las limitaciones adicionales son que el servicio debe comenzar en el nodo i ($i \in N_0$) en cualquier momento después de a_i , pero no más tarde de b_i . Si el tiempo de llegada al nodo i es anterior a a_i , el vehículo puede esperar hasta el tiempo a_i para iniciar el servicio. En el caso de una ventana de tiempo relajada, un servicio tardío no afectará a la viabilidad de la solución, pero será penalizada aumentando el valor de la función objetivo. El VRPTW incluye restricciones como que para cada cliente i , el servicio se inicia dentro de la ventana de tiempo, $[a_i, b_i]$, y el vehículo se detiene por unidades de tiempo t_i .

Una variante más es el Problema con Múltiples Depósitos (MDVRP) que fue estudiado por Surekha y Sumathi [9], el cual establece que una empresa puede tener

varios depósitos desde donde puede servir a sus clientes. Si los clientes están agrupados alrededor de los depósitos, el problema de distribución podría ser modelado como un grupo de VRPs independientes. Sin embargo, si los clientes y los depósitos están entremezclados, su modelado es diferente, a través del MDVRP. Este tipo de problemas requiere una asignación de cada cliente a un depósito, que dispone de su propia flota de vehículos. Cada uno de ellos, debe salir de un depósito, servir al cliente y regresar al mismo depósito de salida. El objetivo del MDVRP es el de dar servicio a todos los clientes y minimizar el número de vehículos y de distancia recorrida por los mismos.

Otro caso es el VRP dependiente del tiempo (TDVRP) que fue analizado por Malandraki y Daskin [10], en este el tiempo de viaje entre dos clientes o entre un cliente y el depósito depende de la distancia entre los puntos y la hora del día. El objetivo es reducir al mínimo el tiempo total empleado en todas las rutas, que también debe garantizar las entregas a los clientes dentro de las ventanas de tiempo preestablecidas. El tiempo de viaje se calcula mediante el uso de información sobre la hora de salida y los posibles perfiles de velocidades en cada arco (i, j) , que se supone se conocen al inicio del proceso de optimización.

2.2 ANTECEDENTES DEL VRP QUE CONSIDERAN LA REDUCCIÓN EN EL CONSUMO DE COMBUSTIBLE

Hoy en día, los modelos de engloban objetivos con respecto a consumo de combustible y generación de emisiones se utilizan ampliamente en las áreas de dirección y planeación de tráfico, pero en lo que respecta al ruteo de vehículos dentro sistemas logísticos de transporte puede decirse que es un área relativamente nueva en la investigación de este tipo de problemas. A continuación, se describen brevemente algunos de los trabajos previos que han abordado el tema de minimización de consumo de combustible dentro del problema de ruteo de vehículos.

Christie y Satir [11] buscaron aumentar la eficiencia de las empresas mediante una mejor gestión de la logística. Por medio de un modelo de optimización trabajaron en la reducción de consumo de combustible. Sus resultados proyectaron un ahorro significativo de hasta un 40 % en el uso del combustible y su consecuente reducción en la contaminación atmosférica, al mismo tiempo que redujeron los costos operativos al mínimo. Este modelo consideraba como caso particular la programación de camionetas y entregas (scheduling of pickups and deliveries) de una terminal de camiones de carga.

Kara, Kara y Yetis [12] introdujeron el problema de ruteo de vehículos para minimización de energía (EMVRP). En él se define una nueva función de costo que tiene en cuenta tanto la carga del vehículo como las distancias. La función objetivo minimiza el trabajo total realizado por los vehículos en su ruta, como un múltiplo de la longitud de arco recorrido en una red de nodos y la carga total del vehículo en este arco recorrido. Esto conduce a minimizar el consumo de combustible total. Como resultado, establecieron que la carga del vehículo también influye en la energía consumida y como consecuencia en el consumo de combustible.

Por su parte, Palmer [13] propone una integración de los elementos que deben ser tomados en cuenta en la planificación del transporte que influyen en el medio ambiente, mediante modelos de optimización que trabajan con el problema de ruteo de vehículos considero además del tiempo y distancia, elementos como la carga del vehículo y la velocidad, para conocer qué relación había entre estos elementos y el consumo de combustible y la reducción de emisiones de CO_2 . Estos modelos fueron trabajados en diversos escenarios y considerando ventanas de tiempo.

Otro estudio relacionado a esta área fue el realizado por Hsu, Hung y Li [14] quienes hicieron consideraciones de la energía utilizada por los vehículos que transportan alimentos perecederos que necesitan de un equipo de almacenamiento frío para poder ser distribuidos, lo cual aumenta el consumo de combustible de las unidades. El objetivo de su problema fue minimizar la función de costo total, incluyendo

transporte, inventario, energía y penalizaciones por violación de las ventanas de tiempo. La función que calcula la energía toma en cuenta la carga térmica de un vehículo y se expresa en función del tiempo total de viaje y del tiempo dedicado a servir a los clientes.

Yong and Xiaofeng [15] proporcionan un problema de ruteo de vehículos que minimiza el consumo de combustible. Ellos establecen que evaluar también este aspecto es importante porque además de reducir al mínimo los costos de servicios, también se reduce el impacto en el medio ambiente y en la salud. Para sus cálculos, ellos consideran el consumo de combustible por kilómetro en con el vehículo vacío, y el consumo de combustible por kilómetro por unidad de carga del vehículo.

Otro estudio de este tipo fue el realizado por Maden y otros [16], en el cual se aborda el problema de ruteo de vehículos para minimizar el tiempo total de viaje en virtud de la congestión y a la vez reducir las emisiones al medio ambiente. Los autores toman en cuenta la congestión regular debido a volumen de tráfico, obras viales y de larga duración que puede predecirse a partir de datos históricos. Proponen un modelo para considerar los tiempos de viaje que varían con el tiempo. Con el fin de reflejar las características de un problema de la vida real, su modelo permite conocer el tiempo necesario para viajar entre ubicaciones en función de la hora en la que comienza el viaje.

Figliozzi [17] introdujo el problema VRP de emisiones (EVRP). En él se minimizan las emisiones de contaminantes y el consumo de combustible simultáneamente. En el problema contempló ventanas de tiempo al mismo tiempo que las restricciones de capacidad y la duración de las rutas. Igualmente considera que se tiene información de la influencia de la congestión vehicular en las velocidades de desplazamiento. El volumen de emisiones es en función de la velocidad del vehículo y ésta dependerá de la hora de salida en cada nodo de la red.

Otro aporte muy interesante es el modelo TDVRP para minimizar el consumo de combustible descrito por Kuo [18], en el cual se propone una formulación que

supone que la velocidad y los tiempos de viaje dependerán del momento del viaje. El modelo no sólo se toma en consideración la carga del vehículo, sino que también se satisface la propiedad de que no existan despachos muy tempranos o muy tardes. Al igual que Figliozzi [17] llega a la conclusión de que el consumo de combustible es dependiente del tiempo, ya que las velocidades de viaje y los tiempos de viaje dependen de la hora de salida. Los resultados del autor muestran que su método propuesto proporciona una mejora de 24 % en el consumo de combustible con un método que minimiza el tiempo de transporte, y una mejora del 22 % con respecto a un método que minimiza las distancias de transporte.

Bektas y Laporte [19] definen el problema de ruteo de contaminación dependiente del tiempo o Time-Dependent Pollution Routing Problem (TDPRP) como una variante del VRP clásico. En este, utilizan una función multi-objetivo que mide y reduce al mínimo el costo de las emisiones de gases de efecto invernadero, junto con los costos operativos de los conductores y el consumo de combustible. Ellos analizan y comparan diversos factores que afectan el rendimiento del ruteo de vehículos, tales como la velocidad, la distancia y la carga. Estos autores asumen que la carga y la velocidad pueden cambiar de un arco a otro en el viaje de un vehículo, pero que el resto de los parámetros se mantienen constantes.

Suzuki [20] estudia el problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo para minimizar el consumo de combustible y las emisiones de contaminantes, teniendo en cuenta las limitaciones de tiempo y considerando múltiples paradas en las rutas. Este autor analizó que la entrega de la mercancía de mayor peso en los primeros nodos de una ruta puede producir un ahorro significativo en el consumo de combustible.

Xiao, Zhao, Kaku, y Xu [21], desarrollaron un modelo de consumo de combustible que considera una tasa de consumo de combustible para un problema de ruteo de vehículos capacitado, este modelo toma la tasa de consumo de combustible como un factor dependiente de la carga del vehículo. Otros factores que condicionan el

modelo son la distancia, velocidad, condiciones de los caminos y horarios del viaje.

Erdogan y Miller-Hooks [22] introdujeron el problema de ruteo de vehículos verde (GVRP). Este modelo ayuda a las organizaciones con flotas de vehículos impulsadas por diferentes tipos de combustibles (AFV) a buscar rutas de vehículos que minimizan la distancia total recorrida para servir a un conjunto de clientes, a la vez que introduce paradas de recarga en estaciones de combustibles alternativos (AFS), a fin de eliminar el riesgo de quedarse sin combustible.

Küçükoglu, Ene, Aksoy, y Öztürk [23] describen un modelo de optimización de consumo de combustible para un problema de ruteo de vehículos verde capacitado (G-CVRP). El modelo permite calcular el consumo de combustible para una carga y distancia dada, y también permite determinar la ruta que minimiza el consumo de combustible para diferentes tipos de vehículos con capacidades diferentes.

Soysal, Bloemhof-Ruwaard, y Bektaş [24] plantearon una estrategia de distribución multi escalón en la que la carga se entrega a los clientes a través de depósitos intermedios en lugar de utilizar envíos directos, esto con el objetivo de reducir el uso de recursos y la contaminación generada por estos. Estos autores presentan una formulación que comprende Programación Lineal Entera Mixta para un problema de ruteo de vehículos capacitado de dos escalones en función del tiempo, el cual considera el tipo de vehículo, la distancia recorrida, la velocidad del vehículo, la carga, las múltiples zonas horarias y las emisiones.

Zhang, Wei, y Lim [25] presentan una nueva variante del problema de ruteo y carga llamado: problema de ruteo de vehículos capacitado minimizando el consumo de combustible bajo la restricción de carga tridimensional (3L-FCVRP). Ellos trabajan bajo el supuesto de que la tasa de consumo de combustible es proporcional al peso total del vehículo, por lo cual es muy importante revisar el acomodo de las mercancías de acuerdo a la capacidad de cada unidad antes de iniciar el recorrido de una ruta.

Zhang, Zhao, Xue, y Li [26] estudiaron un problema de ruteo de vehículos

(VRP) considerando el consumo de combustible y las emisiones de carbono, para lo cual incorporaron el costo del combustible, el costo por las emisiones de carbono, y el costo de usar el vehículo al esquema tradicional del VRP. Fue así como establecieron un modelo de problema de enrutamiento de bajo carbono que permite obtener una solución satisfactoria que mantiene la mejor relación entre la distancia, el consumo de combustible, el tiempo de viaje, y otros parámetros.

Este modelo ejemplifica claramente como la configuración de rutas y vehículos basada en el consumo de combustible y las emisiones de carbono, son tanto económicas como ecológicas.

Como se puede observar, son distintas las características de cada problema del cual existe registro en literatura, como muestra de esto esta lo presentado párrafos arriba. Cada problema se adaptado a las circunstancias en que fue planteado. Cada autor ha considerado para la formulación de su problema aquellos elementos que considera pueden influir en el resultado final. La gran mayoría de los autores ha coincidido en que la carga del vehículo así como la velocidad del mismo son factores que tienen un impacto relevante en este tipo de problemas. En el siguiente sección hablaremos más detalladamente de cuáles son los factores que influyen en el consumo de combustible al realizar un ruteo de vehículos para una de las operaciones logísticas más importantes y de mayor participación en los costos de operación, hablamos de la distribución de mercancías.

2.3 FACTORES DE QUE AFECTAN EL CONSUMO DE COMBUSTIBLE EN EL PROBLEMA DE RUTEO DE VEHÍCULOS

Los factores que influyen en el consumo de combustible han sido estudiados por diversos autores en la última década como se pudo ver en la sección anterior,

sin embargo, en años recientes, Demir, Bektas y Laporte [27] han trabajado en una clasificación de estos factores en cinco grandes categorías; vehículo, medio ambiente, tráfico, conductor y operaciones. Un resumen de esta clasificación puede verse en la figura 2.1.

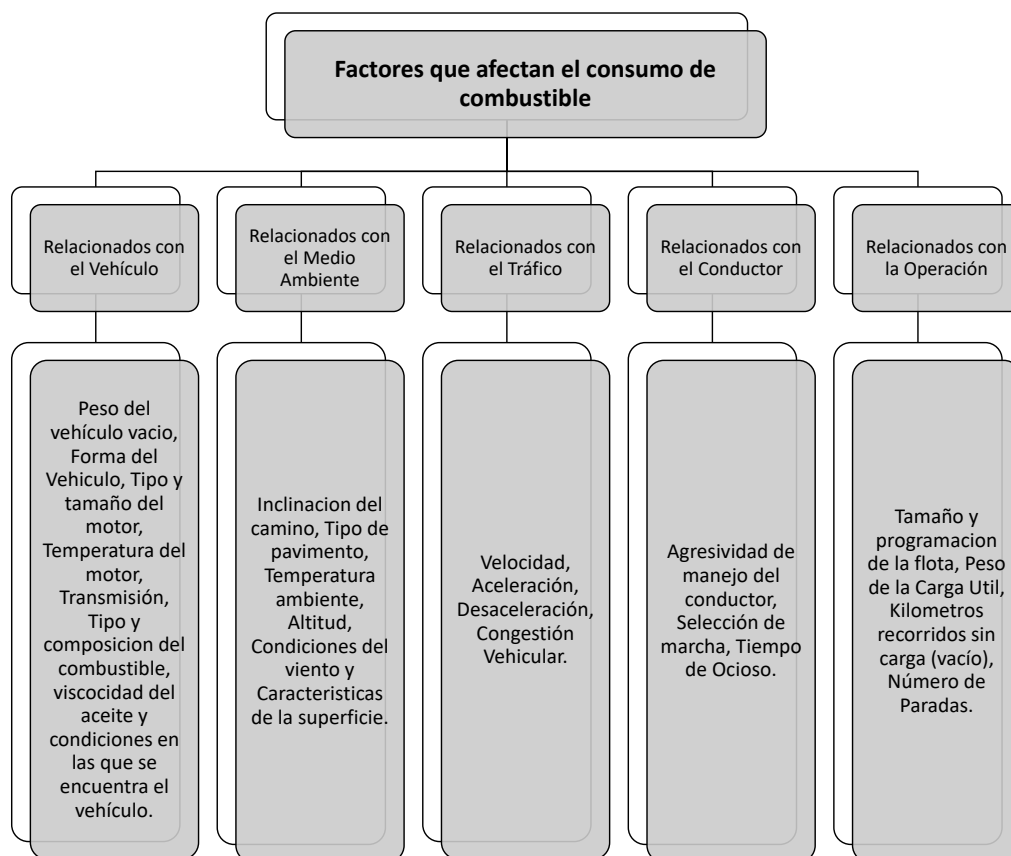


Figura 2.1: Factores que afectan el consumo de combustible.

La mayoría de los modelos de consumo de combustible se concentran en el vehículo, el tráfico y las influencias ambientales, pero no toman en cuenta problemas relacionados con el conductor ya que son relativamente difíciles de medir. Por otro lado, los factores relacionados con las operaciones suelen considerarse externalidades que afectan al consumo de combustible.

En una importante obra de Eglese y Black [28] se presenta un estudio de las emisiones procedentes del enrutamiento y enumera algunos de los factores que influyen en el consumo de combustible. En contraste con la literatura existente, los

autores sostienen que la velocidad es más importante que la distancia recorrida en la estimación de las emisiones. En otro estudio, Demir y otros autores [29] comparan varios modelos de emisiones y mencionan otros factores relevantes, tales como: el peso y distribución de la carga, tipo y tamaño del motor, el diseño del vehículo, y la pendiente de la carretera.

El transporte por carretera se realiza en su mayoría por vehículos de combustión interna que utilizan algún derivado del petróleo como combustible, son pocas las empresas cuyas flotas vehiculares se mueven con algún otro tipo de energía limpia. Para que un vehículo pueda moverse, un motor debe proporcionar energía suficiente a las llantas a través de la transmisión para poder superar los efectos de la inercia, resistencia a la rodadura, la resistencia al viento, pendiente de la carretera, etc. Ejemplos de estudios previos de cada uno de estos factores que afectan el consumo de combustible en las rutas de transporte son descritos por Demir, Bektas y Laporte [27] en un trabajo realizado en 2014, algunos de los puntos más importantes se muestran a continuación:

- Velocidad: El consumo de combustible depende de varios factores, pero la velocidad es la más importante porque afecta a la inercia, a la resistencia a la rodadura, a la resistencia del aire y de la pendiente de carretera. Según Demir y otros investigadores [29], una regla de oro para el vehículo mediano es que el consumo de combustible aumenta aproximadamente 0.001 litros/kilómetro por cada kilómetro/hora de aumento por encima de 55 km/h. La disminución de la velocidad del vehículo a partir de 100 km/h a 90 km/h puede reducir el consumo de combustible en aproximadamente 0.02 litros/kilómetro. En otro trabajo de Demir y otros autores [30] han derivado una velocidad de conducción óptima y han demostrado que las reducciones en las emisiones podrían alcanzarse mediante la variación de velocidad. Pese a esto, debe tenerse en cuenta que la velocidad de conducción óptima varía en cierta medida entre las áreas geográficas debido a los límites de velocidad y la densidad del tráfico.

- Pendiente de la carretera: La demanda de potencia de las ruedas aumenta significativamente con el peso del vehículo en las pendientes de la carretera. En algunas regiones, la pendiente de la carretera juega un papel importante y puede resultar en emisiones de CO_2 más altas. El estudio de Demir y otros investigadores [29] muestra que el consumo de combustible de un vehículo mediano en una pendiente de 1 % puede aumentar hasta en seis litros en un segmento de carretera de 100 kilómetros. Lo contrario también es cierto: si se viaja sobre una superficie pendiente negativa se reduce el consumo de combustible. Con la ayuda de un software GIS (Geographic Information Systems) avanzado, se puede cambiar la velocidad en una porción de un segmento de carretera con el fin de reducir el consumo de combustible.

- La congestión vehicular aumenta el consumo de combustible debido a que se emplea una menor velocidad que la óptima. Esto es apoyado por Van Woensel y otros [31] que han evaluado las diferencias en las emisiones de CO_2 entre el uso de velocidades constantes y velocidades dependientes del flujo. Según un estudio de vehículos en una autopista, se ha demostrado que las emisiones de CO_2 generadas por velocidades variadas son en promedio un 11 % más altas que las emisiones de CO_2 calculadas usando una velocidad constante. Un aumento máximo de 40 % también se observó durante el periodo de hora pico de más congestionamiento. Viajar 25 % del total de kilómetros en las carreteras congestionadas aproximadamente se traduce en un aumento del 15 % en el consumo de combustible.

- Conductor: Uno de los factores más importantes que afectan el consumo de combustible es el conductor que controla la velocidad del vehículo, la velocidad de aceleración, el uso del freno, la técnica de desplazamiento, el tiempo de inactividad, la presión de inflado de neumáticos entre otros. CAT [32] muestra que la diferencia en el consumo de combustible entre los mejores y los peores conductores puede ser hasta de un 25 % en segmentos de carretera de 100 kilómetros.

- El tamaño de la flota y su combinación: Seleccionar el tipo de vehículo tiene un impacto significativo en el consumo de combustible. Los vehículos pequeños que

tienen motores más pequeños que consumen menos combustible que los vehículos más grandes. Sin embargo, el uso de un vehículo grande puede dar lugar a un menor consumo de combustible que el uso de dos vehículos más pequeños. Según Demir y otros autores [29], para una cierta cantidad de carga útil, la diferencia entre un vehículo mediano y un vehículo pesado puede ser de hasta 14 litros de combustible en un segmento de carretera de 100 kilómetros.

- Carga útil: El aumento de la carga útil aumenta la demanda de potencia del motor, lo que conduce a un mayor consumo de combustible. La carga útil del vehículo afecta a la fuerza de inercia, la fuerza de resistencia y la fuerza de rodadura por inclinación del camino. Por estas razones la carga útil es importante en las decisiones de enrutamiento. Kara, Kara, y Yetis [12], y Bektas y Laporte [19] han estudiado el efecto de la carga útil en el consumo de combustible. Demir y otros [29] muestran un caso en el que con una carga promedio de una tonelada, se aumenta el consumo de combustible en aproximadamente tres litros más en un segmento de carretera de 100 kilómetros. CAT [32] muestra otro caso en el que una reducción en la carga útil de 4500 kg reduce el consumo de combustible en aproximadamente un 4.4 %. Por otra parte, una reducción del peso bruto de 36,000 kilogramos a 27,000 kilogramos genera una mejora de 8.8 % en el ahorro de combustible.

- Los kilómetros en vacío son los kilómetros recorridos por los vehículos sin carga y deben evitarse tanto como sea posible, reducirlos siempre resulta en un menor consumo de combustible. La mayor parte de las operaciones de enrutamiento empezar o terminar en un depósito con una carga vacía. Los kilómetros de conducción sin carga a menudo son resultado de falta de información. Por ejemplo, si una empresa de transporte no tiene la información de que bienes están a la espera de ser transportados cerca de donde un conductor acaba de entregar una carga, simplemente se le pedirá al conductor que regrese a la estación con el camión vacío y desaprovechando la oportunidad de reducir costos. De manera general podemos ver que en los diversos artículos que se revisaron para esta sección, la mayoría de los autores toman en cuenta la velocidad y la carga en sus formulaciones. La velocidad

tiene un efecto significativo en el consumo de combustible, y por ende la velocidad óptima podría llevar una mejor reducción de emisiones de CO_2 . En segundo lugar, la congestión es otro factor importante, pero sólo muy pocos estudios han analizado en este factor. En tercer lugar, el comportamiento del conductor y la pendiente de la carretera se estudian sobre todo en los estudios de eco-enrutamiento con la ayuda de softwares GIS (Geographic Information Systems). Por último, el tamaño y programación de la flota están atrayendo cada vez más la atención debido a los beneficios de seleccionar el tipo de vehículo y su carga, esto principalmente por el hecho de que el peso total del vehículo está directamente relacionado con el consumo de combustible y el peso adicional conllevará en un mayor consumo.

2.4 MÉTODOS SOLUCIÓN

Diversos han sido los métodos por los cuales se ha dado solución a los problemas de minimización de consumo de combustible en el ruteo de vehículos. En la mayoría de la revisión de literatura se pudieron observar métodos tanto exactos como aproximados. Los algoritmos exactos buscan una solución óptima y su principal desventaja es que, dado que se trata de problemas NP-Completo, suelen requerir tiempos de ejecución muy grandes, lo que dificulta su aplicación en la vida real. Por otra parte, los métodos aproximados (heurísticos) permiten obtener una solución que no necesariamente es óptima, pero en tiempos de ejecución menores a los de los métodos exactos.

2.4.1 MÉTODOS EXACTOS

De acuerdo a Baldacci y Mingozzi [33] los métodos exactos de resolución para este tipo de problemas suelen basarse en la formulación como un problema de programación entera mixta (MIP, Mixed Integer Programming), la cual suele resolverse

mediante la aplicación de algoritmos de ramificación y acotación. Actualmente se ha desarrollado un enfoque unificado para resolver los distintos tipos de problemas derivados del VRP.

Entre los métodos exactos destacan los algoritmos de ramificación y acotación (Branch and Bound, B&B). Toth y Vigo [34] en el año 2000 propusieron una formulación como un problema lineal, de esta forma, existe la posibilidad de fijar cotas sobre la combinación de localizaciones permitiendo la aplicación de un algoritmo B&B, en la cual se realizan subconjuntos de soluciones que se evalúan respecto a su contribución en la función objetivo. En base a lo anterior se van definiendo unas cotas inferiores y superiores que permiten decidir si se ramifica o no el árbol de soluciones. En el caso de que esas cotas no permitan encontrar soluciones factibles o que provoquen una ramificación excesiva, se aplican relajaciones sobre las mismas para obtener lo que se conoce como soluciones rápidas.

A pesar del hecho de que los algoritmos exactos suelen ser desechados para la resolución de problemas que impliquen el manejo de una gran cantidad de datos, autores como Kontoravdis y Bard [35] han propuesto emplearlos para evaluar la calidad de los heurísticos. Mediante el empleo de técnicas de programación dinámica y B&B, han podido comprobar el buen funcionamiento mediante acotaciones inferiores para problemas con las mismas restricciones de ventana de tiempo y capacidad. Sin embargo, cuando se trata de problemas más complejos que implican múltiples depósitos, entregas y recolecciones simultáneas, y objetivos múltiples entre otros, se requiere forzosamente hacer uso de otro tipo de técnicas.

2.4.2 MÉTODOS APROXIMADOS

En ocasiones, dados los elevados tiempos necesarios para ejecutar los métodos exactos, los algoritmos aproximados o heurísticas surgen como una alternativa más práctica para resolver estos problemas. Estas técnicas se basan en diversas ideas sobre

cómo buscar buenas soluciones, algunas se inspiran en sistemas naturales y otras se basan en la experiencia e intuición de sus creadores sobre cómo hacer más efectiva la búsqueda. Mediante el uso de heurísticas se ha conseguido resolver instancias con miles de nodos e incorporar de manera sencilla diversos tipos de restricciones. No obstante, el precio que se paga por obtener tiempos de ejecución más cortos es la falta de una garantía de optimalidad en las soluciones encontradas. Los algoritmos aproximados que han sido propuestos para resolver problemas de ruteo de vehículos pueden clasificarse en dos categorías: heurísticas clásicas y metaheurísticas.

Las heurísticas clásicas para el VRP se pueden clasificar generalmente en tres categorías.

- Las heurísticas constructivas, las cuales construyen gradualmente una solución factible, teniendo en cuenta en gran medida el costo de la solución.
- Las heurísticas de dos fases, en las que el problema se descompone en dos partes: primeramente, la agrupación de vértices en rutas factibles y posteriormente la construcción de la ruta.
- Métodos de mejora, estos son aquellos que intentan mejorar la calidad de cualquier solución factible, realizando una serie de intercambios de vértices o de tramos de vértices dentro de una misma ruta o entre distintas rutas de vehículos.

La distinción entre los métodos constructivos y los métodos de mejora es frecuentemente poco clara, ya que muchos de los algoritmos incorporan pasos de mejora en sus etapas.

En contra parte, según Ólafsson [36] las metaheurísticas son estrategias (heurísticas) generales para la solución de una gran variedad de problemas para los cuales no existe un algoritmo confiable de solución, ya sea por la complejidad del problema, o por falta de estudios en la forma de solución de éste. Estos métodos de solución tienen un rol fundamental en la Investigación de Operaciones, pues pueden ser aplicados a problemas de Optimización Combinatoria, con resultados muy cercanos al

óptimo. Se basan en la observación de la naturaleza, la evolución biológica, procesos físicos asociados a la manufactura, etc. A continuación, se enlistan algunos de las metaheurísticas más utilizadas en la solución de problemas de ruteo de vehículos.

- Recocido simulado
- Búsqueda Tabú
- Algoritmos Genéticos
- Colonias de Hormigas
- Redes Neuronales

En términos generales podemos decir que las heurísticas clásicas logran obtener resultados relativamente buenos en tiempos de ejecución muy cortos, pero los mejores resultados conocidos son obtenidos, en general, por las metaheurísticas, a pesar de que estas incurren en largos tiempos de ejecución.

2.5 OPTIMIZACIÓN MULTIOBJETIVO

La optimización multiobjetivo es una parte de la programación matemática que se encarga de problemas de decisión con múltiples funciones objetivo que deben ser optimizadas sobre un conjunto factible de soluciones. Según Marler y Arora [37], se llama optimización multiobjetivo (MOO) al proceso de optimizar de manera sistemática y simultánea una colección de funciones objetivo. En estos casos no hay una solución global única, sino que es necesario determinar un conjunto de puntos que correspondan a las mejores soluciones, conocido como conjunto de Pareto.

Casi todos los problemas reales involucran la optimización de varios objetivos que a menudo están en conflictos y compiten entre sí. Mientras que en la optimización con un simple objetivo usualmente la solución óptima está claramente bien definida, no sucede lo mismo en problemas con objetivos múltiples. En lugar de un óptimo

simple, existen un conjunto de alternativas conocidas como soluciones óptima Pareto.

Éstas soluciones son óptimas en al amplio sentido de que ningunas otras soluciones son superiores a éstas cuando todos los objetivos son considerados. Los problemas de optimización multiobjetivo son muy comunes en el área de la ingeniería y las técnicas para resolverlos muy diferentes a las empleadas en la optimización simple.

Un problema general de MOO incluye un conjunto de n parámetros (variables de decisión), un conjunto de k funciones objetivo y un conjunto de m restricciones. Las funciones objetivo y las restricciones son funciones de las variables. La meta de la optimización puede ejemplificarse de la siguiente forma:

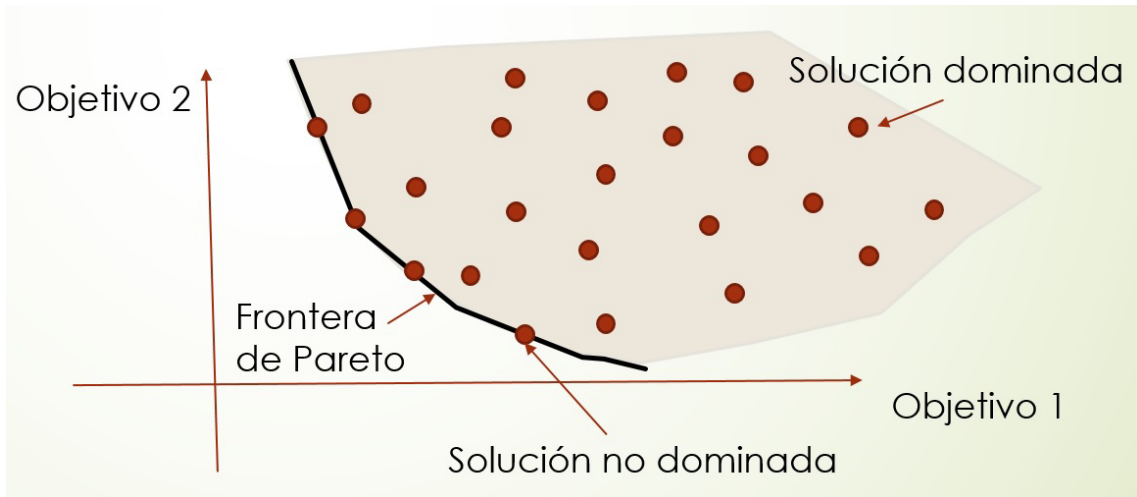


Figura 2.2: Frontera eficiente de optimización.

En este caso “ x ” es el vector de decisión, “ y ” es el vector objetivo. El espacio de decisión se denota por X y el espacio objetivo por Y . Las restricciones $r(x) \leq 0$ determinan el conjunto de soluciones factibles. El conjunto de todas las soluciones óptimas eficientes es conocido como frontera eficiente o frontera Pareto óptima como se observa en la Figura 2.2.

Esta frontera de soluciones contiene todos los puntos que no son superados en todos los objetivos por otra solución. Este concepto lleva el nombre de dominancia,

por esta razón la frontera de Pareto consiste solo de soluciones no dominadas. Una solución domina a otra si y sólo si, es al menos tan buena como la otra en todos sus objetivos y es mejor en al menos uno de ellos.

Este concepto puede desglosarse como se muestra en la figura 4, donde la solución “a” pertenece a conjunto de soluciones óptimas (o soluciones no dominadas) dado que no puede encontrarse una solución “b” tal que mejore uno de los objetivos sin empeorar al menos uno de los otros. En este caso, la solución “c” es dominada por “a” y por “b”.

En resumen, el conjunto de Pareto se define como el conjunto de puntos en el espacio de búsqueda que se corresponden con las mejores soluciones al problema de optimización; y la frontera de Pareto, como el conjunto de soluciones óptimas en el espacio objetivo. Este conjunto de soluciones se integra con aquellos puntos encontrados en el espacio objetivo que se corresponden con las soluciones no dominadas, de acuerdo con el criterio de dominancia de Pareto.

En un problema de MOO el objetivo es hallar el conjunto Pareto Óptimo o Frontera Eficiente. Para alcanzarlo, los métodos tradicionales agregan los objetivos en una simple y parametrizada función objetivo. Tales técnicas, por lo general, llevan a cabo varias corridas con diferentes parámetros de tal manera de obtener un conjunto de soluciones que se aproximen al conjunto Pareto Óptimo. Éstas técnicas son básicamente independientes del algoritmo de optimización subyacente. Ejemplos de ésta clase de técnicas son: método de suma ponderada de objetivos, método de prioridades o restricciones, técnica min-max y programación por metas.

2.5.1 CLASIFICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE SOLUCIÓN DE MODELOS MATEMÁTICOS MULTI OBJETIVO

La clasificación por tipo de técnica se hace en dos grupos: el primero es un conjunto de métodos para generar el conjunto de soluciones, basados en optimización de modelos de programación matemática, y el segundo grupo son algoritmos o heurísticas de aproximación al conjunto de Pareto.

A su vez, estos métodos, independientemente del tipo de técnica como mencionan Aranda y Orjuela [38], pueden clasificarse según la manera en que se expresen las preferencias del tomador de decisiones. La clasificación de los métodos se resume en la Figura 2.3.

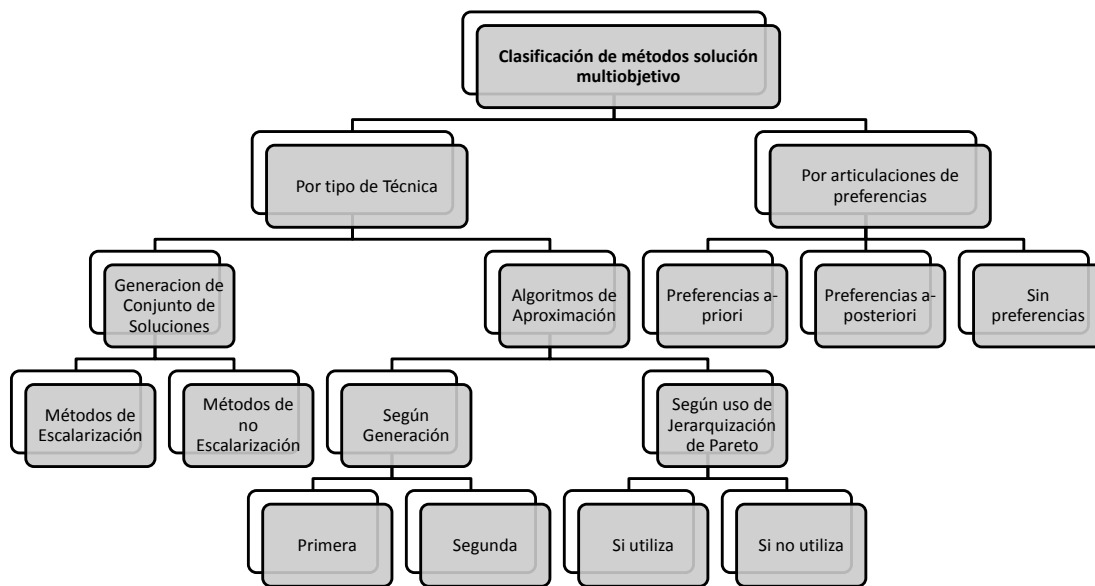


Figura 2.3: Clasificación de métodos solución multiobjetivo.

Por otra parte, para evaluar el rendimiento de una solución, es esencial desarrollar un esquema de medición que cuantifique la calidad del frente de Pareto no dominante. Según Kalyanmoy, Pratap y Agarwal [39] los criterios generales de ren-

dimiento para los algoritmos de optimización multiobjetivos se pueden resumir de la siguiente manera:

- Convergencia: Estima la proximidad de las soluciones candidatas no dominadas (Pareto) a la predicción más conocida o conjunto conocido de soluciones óptimas de Pareto. Para cada solución obtenida usando un algoritmo, puede usar la distancia euclidiana mínima al frente óptimo de Pareto. La distancia media se puede utilizar como medida de convergencia. Un valor más pequeño indica una mejor convergencia.

- Diversidad: Esta medida evalúa que se proporcionen opciones eficientes que cubran toda la región de Pareto-óptima, por lo que es necesario analizar el grado de dispersión entre las soluciones obtenidas.

- Desplazamiento: En el caso de aproximaciones algorítmicas o la presencia de un frente Pareto-óptimo discontinuo, solo una porción del frente óptimo verdadero puede ser reflejada. El desplazamiento se usa para superar esta limitación. El desplazamiento mide la proximidad relativa de la solución candidata ajustada a un conjunto conocido de soluciones Pareto-óptimas. Un valor de desplazamiento inferior representa una mejor convergencia y cobertura.

Cada algoritmo puede seleccionar uno o más criterios de rendimiento para probar la calidad de una solución. En muchos casos, los criterios de rendimiento pueden depender de la disponibilidad (o falta de disponibilidad) de una colección conocida de conjuntos Pareto-óptimos.

CAPÍTULO 3

MODELO

3.1 MODELO BI-OBJECTIVE POLLUTION ROUTING PROBLEM

El problema Bi-objective Pollution Routing Problem desarrollado por Demir, Bektas y Laporte [41] es una extensión del Pollution Routing Problem (PRP) estudiado por Demir, Bektas y Laporte [40] que consiste en crear las rutas para un número de vehículos que servirán a un grupo de clientes, y a la par determinar su velocidad en cada tramo de la ruta.

El bi-objective PRP consiste en construir rutas para un conjunto de vehículos para satisfacer las demandas de todos los clientes de forma que todos los vehículos salgan y retornen al nodo del depósito, ningún vehículo transportara más carga de la que tiene capacidad de llevar, y cada cliente es visitado dentro de una respectiva ventana de tiempo. Además de lo anterior, en el Bi-objective Pollution Routing Problem hay dos objetivos en conflicto, por un lado el consumo de combustible y por otro el tiempo total de conducción.

Este problema es definido como un grafo dirigido completo $G = (N, A)$, donde $N = \{0, \dots, n\}$ es el conjunto de nodos, 0 es el depósito, y $A = \{(i, j) : i, j \in N \text{ y}$

$i \neq j\}$ es el conjunto de arcos. La distancia del nodo i al nodo j es denotada por d_{ij} . Se cuenta con una flota de tamaño fijo de m vehículos, cada uno con una capacidad Q , la cual está disponible para servir a los nodos.

El conjunto $N_0 = N \setminus \{0\}$ es el conjunto de clientes, y cada cliente $i \in N_0$ tiene una demanda no negativa q_i así como un intervalo de tiempo $[a_i, b_i]$ en el cual deberá comenzar el servicio; llegadas tempranas a los nodos cliente son permitidas, pero un vehículo que arribe temprano con un cliente, deberá esperar hasta el tiempo a_i antes de poder comenzar el servicio. El tiempo de servicio del cliente i es indicado por t_i

3.2 ADAPTACIÓN DEL MODELO BI-OBJECTIVE POLLUTION ROUTING PROBLEM

Al usar este modelo para resolver una instancia real se realizaron algunos ajustes como el integrar una función de costos a la función objetivo, esta incluye tanto un costo fijo representado por H , y un costo variable representado por C_{ij} . Los operadores w_1 y w_2 representan los valores de los pesos asignados a cada función objetivo.

Nuestra formulación adaptada, llamada Efficient Pollution Routing Problem (EPRP) designa a p_{ij} como el tiempo promedio que hace un vehículo del nodo i al nodo j , y la velocidad promedio v_{ij} está calculada como el cociente que resulta de dividir la distancia d_{ij} que hay entre cada cliente, entre el tiempo promedio p_{ij} que le toma a un vehículo recorrer del nodo i al nodo j .

Una vez hechas las modificaciones necesarias al modelo Bi-objective Pollution Routing Problem, las variables quedan definidas de la siguiente manera:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{si una ruta viaja al cliente } j \text{ después de visitar al cliente } i. \\ 0, & \text{en cualquier otro caso.} \end{cases}$$

f_{ij} : representa la cantidad total de flujo en cada arco $(i, j) \in A$.

y_j : representa el tiempo en el cual comienza el servicio en el nodo $j \in N_0$.

Luego, nuestro problema lineal entero mixto es definido de la siguiente manera:

$$\text{mín } w_1 F(\text{Costo}) + w_2 F(\text{Emisiones}) \quad (3.1)$$

$$F(\text{Costo}) = H \sum_{i \in N_0} x_{0i} + \sum_{(i,j) \in N} c_{ij} x_{ij} \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned} F(\text{Emisiones}) = & \sum_{(i,j) \in A} \kappa NV \lambda p_{ij} \\ & + \sum_{(i,j) \in A} w \gamma \lambda a_{ij} x_{ij} d_{ij} \\ & + \sum_{(i,j) \in A} \gamma \lambda a_{ij} x_{ij} f_{ij} \\ & + \sum_{(i,j) \in A} \beta \gamma \lambda d_{ij} (v_{ij})^2 \end{aligned} \quad (3.3)$$

Sujeto a:

$$\sum_{j \in N} x_{oj} \leq m \quad (3.4)$$

$$\sum_{j \in N} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in N_0 \quad (3.5)$$

$$\sum_{i \in N} x_{ij} = 1 \quad \forall j \in N_0 \quad (3.6)$$

$$\sum_{j \in N} f_{ji} - \sum_{j \in N} f_{ij} = q_i \quad \forall i \in N_0 \quad (3.7)$$

$$q_j x_{ij} \leq f_{ji} \leq (Q - q_i) x_{ij} \quad \forall (i, j) \in A \quad (3.8)$$

$$y_i - y_j + t_i + p_{ij} \leq k_{ij}(1 - x_{ij}) \quad \forall i \in N, j \in N_0, i \neq j \quad (3.9)$$

$$a_i \leq y_i \leq b_i \quad \forall i \in N_0 \quad (3.10)$$

$$x_{ij} \in \{1, 0\} \quad \forall (i, j) \in A \quad (3.11)$$

$$f_{ij} \geq 0 \quad \forall (i, j) \in A \quad (3.12)$$

$$y_i \geq 0 \quad \forall i \in N_0 \quad (3.13)$$

$$(3.14)$$

La Función objetivo (3.1) representa la suma ponderada de la función de costo y de la función de emisiones. La función costo (3.2) está integrada por un costo fijo relacionado con la utilización de los vehiculos, y con un costo variable directamente proporcional a la distancia que se recorra entre cada cliente. Por su parte, la función emisiones (3.3) está compuesta por el total de combustible utilizado en las rutas vehiculares que cumplan con la demanda de los clientes.

En el caso de las restricciones, la restricción (3.4), esta establece que todos los vehículos deben dejar el depósito. Las restricciones (3.5) y (3.6) aseguran que cada cliente es visitado únicamente una sola vez. La restricciones (3.7) y (3.8) definen el flujo en los arcos, mientras que la restricción (3.9) evita la formación de sub-rutas. En el caso de la restricción (3.10), esta asegura que se cumplan con las ventanas de tiempo. Finalmente, las restricciones (3.11), (3.12) y (3.13) son las restricciones de estado.

Los demás parámetros y sus valores utilizados en este problema se muestran en la tabla 3.1.

Notación	Descripción	Valor
w	Peso del vehículo vacío (kg)	6350
Q	Capacidad del vehículo (kg)	3650
ϵ	Relación de masa Aire-Combustible	1
κ	Factor de fricción del motor (kJ/revoluciones/litros)	0.2
N	Velocidad del motor (revoluciones/s)	33
V	Desplazamiento del motor (litros)	5
g	Constante gravitacional (m/s ²)	9.81
C_d	Coeficiente de resistencia aerodinámica	0.7
p	Densidad del Aire (kg/m ³)	1.2041
A	Área de la superficie frontal del vehículo (m ²)	3.912
C_r	Coeficiente de resistencia a la rodadura	0.01
n_{tf}	Eficiencia tren motriz del vehículo	0.4
n	Parámetro de eficiencia para motores diésel	0.9
K	Valor de calentamiento de un combustible diésel típico (kJ/g)	44
ψ	Factor de Conversión (g/s a litros/s)	737
l^{ij}	Límite de velocidad inferior en arco (i, j) (m/s)	5.5
H	Costo fijo por vehículo (\$)	1500
τ	Aceleración (m/s ²)	0
θ	Ángulo de inclinación de la carretera	0
α	Constante específica vehículo-arco	0.0981
β	Constante específica del vehículo	1.64865
λ	Constante	0.000030837
γ	Constante	0.002777777

Tabla 3.1: Parámetros del Problema.

CAPÍTULO 4

EXPERIMENTACIÓN

4.1 ETAPAS DE ANÁLISIS DEL EFFICIENT POLLUTION ROUTING PROBLEM (EPRP)

Para esta etapa, se realizaron tres fases de experimentación, la primera fase comprende la validación del modelo para saber hasta qué tipo de instancias pueden ser resueltas con los recursos computacionales con los que contamos para la realización de este trabajo. La segunda fase incluye una comparación entre nuestro modelo EPRP y el modelo de Demir, Bektas y Laporte [41], para saber cómo puede variar el comportamiento del modelo cuando utilizamos un tiempo promedio de recorrido en vez de un conjunto de velocidades. Finalmente, la tercera fase muestra el comportamiento del modelo en una instancia real y cómo cambian la programación de las rutas de acuerdo al peso que se le asigne a la función costos y a la función emisiones.

4.1.1 PRIMERA FASE DE EXPERIMENTACIÓN

En esta primera etapa utilizamos datos de un repositorio de instancias con el cual trabajo Demir, Bektas y Laporte [41], en el cual se incluye información acerca de

las distancias entre cada nodo (ciudades de Reino Unido), sus demandas, las ventanas de tiempo y los tiempos de servicio para cada uno. Para resolver estas instancias se utilizó GAMS (General Algebraic Modeling System) con CPLEX versión 12, y se ejecutó en un servidor Lenovo con un procesador de 3.1 GHz y 4 Gb RAM.

Nosotros trabajamos esta etapa de validación con 10 instancias de 50, 75 y 100 nodos, de las cuales obtuvimos los resultados que se muestran a continuación en las tablas 4.1, 4.2 y 4.3.

N de instancia	GAP	Tiempo(s)
1	7.8 %	2593
2	0.3 %	3600
3	5.4 %	3600
4	11.2 %	3600
5	3.6 %	3034
6	8.7 %	2928
7	12.2 %	2119
8	11.7 %	2550
9	4.9 %	2914
10	4.5 %	3600

Tabla 4.1: Resultados para instancias de 50 nodos

En la tabla 4.1 podemos observar como en todas las instancias se pudo encontrar una solución cercana al punto óptimo dentro del tiempo límite (una hora) asignado para encontrar dicha solución. Para esta experimentación que se realizo con instancias de 50 nodos el GAP más alto que se obtuvo fue del 12.2

En el caso de la tabla 4.2 también podemos observar como en todas las instancias se pudo encontrar una solución cercana al punto óptimo dentro del tiempo límite (tres horas) asignado para encontrar dicha solución. Para esta experimentación que se realizo con instancias de 75 nodos el GAP más alto que se obtuvo fue del 9.4

N de instancia	GAP	Tiempo(s)
1	1.2 %	6586
2	6.7 %	3737
3	8 %	10800
4	6.7 %	3977
5	6.7 %	4056
6	7.4 %	4451
7	5.9 %	9020
8	7.4 %	4569
9	5.8 %	4020
10	9.4 %	10800

Tabla 4.2: Resultados para instancias de 75 nodos

N de instancia	GAP	Tiempo(s)
1	-	0
2	6.7 %	4849
3	5.6 %	10800
4	-	0
5	-	10800
6	-	10800
7	8.9 %	6555
8	2.3 %	10800
9	9.3 %	3978
10	8.5 %	10800

Tabla 4.3: Resultados para instancias de 100 nodos

Finalmente en la tabla 4.3 se muestra como ya no fue posible resolver todas las instancias con los recursos computacionales con lo que contábamos, pues solo en 6 instancias se logro obtener una solución cercana al punto óptimo dentro del tiempo límite (tres horas). Para esta experimentación que se realizo con instancias de 100 nodos el GAP más alto que se obtuvo fue del 9.3

4.1.2 SEGUNDA FASE DE EXPERIMENTACIÓN

En esta etapa comparamos la convergencia del modelo para un primer caso donde utilizamos tres velocidades (mínima, media y máxima) posibles para cada arco como lo establece Demir, Bektas y Laporte [41] en su modelación matemática. En el segundo caso trabajamos con un tiempo promedio para recorrer cada arco, el cual es calculado a partir de una solo velocidad promedio.

Los resultados de esta comparación para instancias de 50 nodos se muestran en la tabla 4.4.

Los resultados de esta etapa muestran que el utilizar una sola velocidad promedio en vez de un conjunto de velocidades afecta directamente la convergencia del solver para llegar a una solución óptima. En lo que respecta al GAP, el EPRP solo presento un GAP mayor al 10 % en las instancias 4, 7 y 8, en contraparte el modelo de Demir, Bektas y Laporte [41] lo presento en las instancias 2, 4, 7 y 8.

4.1.3 TERCERA FASE DE EXPERIMENTACIÓN

En esta etapa se utilizaron datos de una instancia real para la experimentación, específicamente se utilizó información sobre los municipios del Estado de Nuevo León, datos como las distancias y los tiempos de recorrido entre cada municipio, los cuales fueron obtenidos de la página Traza tu ruta de la Secretaría de Comunicaciones

Instancia	Solución		GAP		Tiempo (s)	
	Demir et al.	EPRP	Demir et al.	EPRP	Demir et al.	EPRP
1	5,944,395	6,893,872	9.2 %	7.8 %	3600	2593
2	5,962,552	6,987,345	11.2 %	0.3 %	3600	3600
3	6,034,147	6,988,808	6.5 %	5.4 %	3600	3600
4	6,910,707	7,881,766	13 %	11.2 %	3600	3600
5	5,254,000	6,449,273	4 %	3.6 %	3600	3034
6	6,659,334	7,527,909	9.9 %	8.7 %	3600	2928
7	5,864,022	6,804,162	14 %	12.2 %	3600	2119
8	5,890,607	6,805,803	13.4 %	11.7 %	3600	2522
9	6,076,356	7,255,093	6.2 %	4.9 %	3600	2914
10	6,090,162	7,005,113	5.7 %	4.5 %	3600	3600

Tabla 4.4: Resultados de comparación entre supuestos de EPRP y Demir et al. para instancias de 50 nodos

y Transportes [42]. Con respecto a la información de las demandas, se utilizó la información del repositorio de datos de Demir, Bektas y Laporte [41] adaptándola a nuestras características del problema.

Para este caso, la experimentación dio como resultado 8 rutas que cubren todas las demandas de los clientes, minimizando tanto el valor de la función costos como el valor de la función emisiones, para este trabajo en esta primera solución se obtuvo dando un mayor peso a la función emisiones que a la función costos, de esta forma se cuidó que el problema al resolverse tuviera como prioridad el minimizar el consumo de combustible (diesel) para cuidar el tema de la cantidad de emisiones de CO_2 . El problema tuvo una buena convergencia y el GAP para este resultado fue de 0.0156 %. Más adelante mostramos cuales son los cambios en las rutas que conllevaría el asignar pesos diferentes a estas dos funciones. Las rutas obtenidas para esta primera solución se muestran a continuación:

- Monterrey, Allende, Rayones, Galeana, Aramberri, General Zaragoza, Mier y Noriega, Doctor Arroyo, Iturbide y Monterrey.
- Monterrey, Apodaca, General Zuazua, Marín, Higuera, Doctor González, Pesquería y Monterrey.
- Monterrey, Ciénega de Flores, Carmen, Abasolo, Mina, Hidalgo y Monterrey.
- Monterrey, San Pedro Garza García, Santa Catarina, García, General Escobedo, San Nicolás de los Garza y Monterrey.
- Monterrey, Guadalupe, Juárez, Los Ramones, Cadereyta y Monterrey.
- Monterrey, Melchor Ocampo, General Treviño, Agualeguas, Parás, Cerralvo, Los Herreras, Los Aldamas, Doctor Coss, General Bravo, China y Monterrey.
- Monterrey, Salinas Victoria, Villaldama, Bustamante, Lampazos de Naranjo, Anáhuac, Vallecillo, Sabinas Hidalgo y Monterrey.
- Monterrey, Santiago, Montemorelos, Hualahuises, Linares, General Terán y Monterrey.

La representación gráfica de como quedaron asignadas las rutas se puede ver en la figura 4.1.

En una segunda experimentación en la cual se disminuyo el peso de la función emisiones pero se conservo el de la función costos podemos notar que la cantidad de rutas obtenidas cambio a 7 y también el orden de los clientes a visitar. El GAP para esta solución fue de 0.0104 %. Las rutas obtenidas para esta segunda solución se muestran a continuación:

- Monterrey, Allende, Rayones, Galeana, Doctor Arroyo, Mier y Noriega, General Zaragoza, Aramberri, Iturbide y Monterrey.
- Monterrey, Melchor Ocampo, General Treviño, Agualeguas, Parás, Cerralvo, Los Herreras, Los Aldamas, Doctor Coss, General Bravo, China y Monterrey.

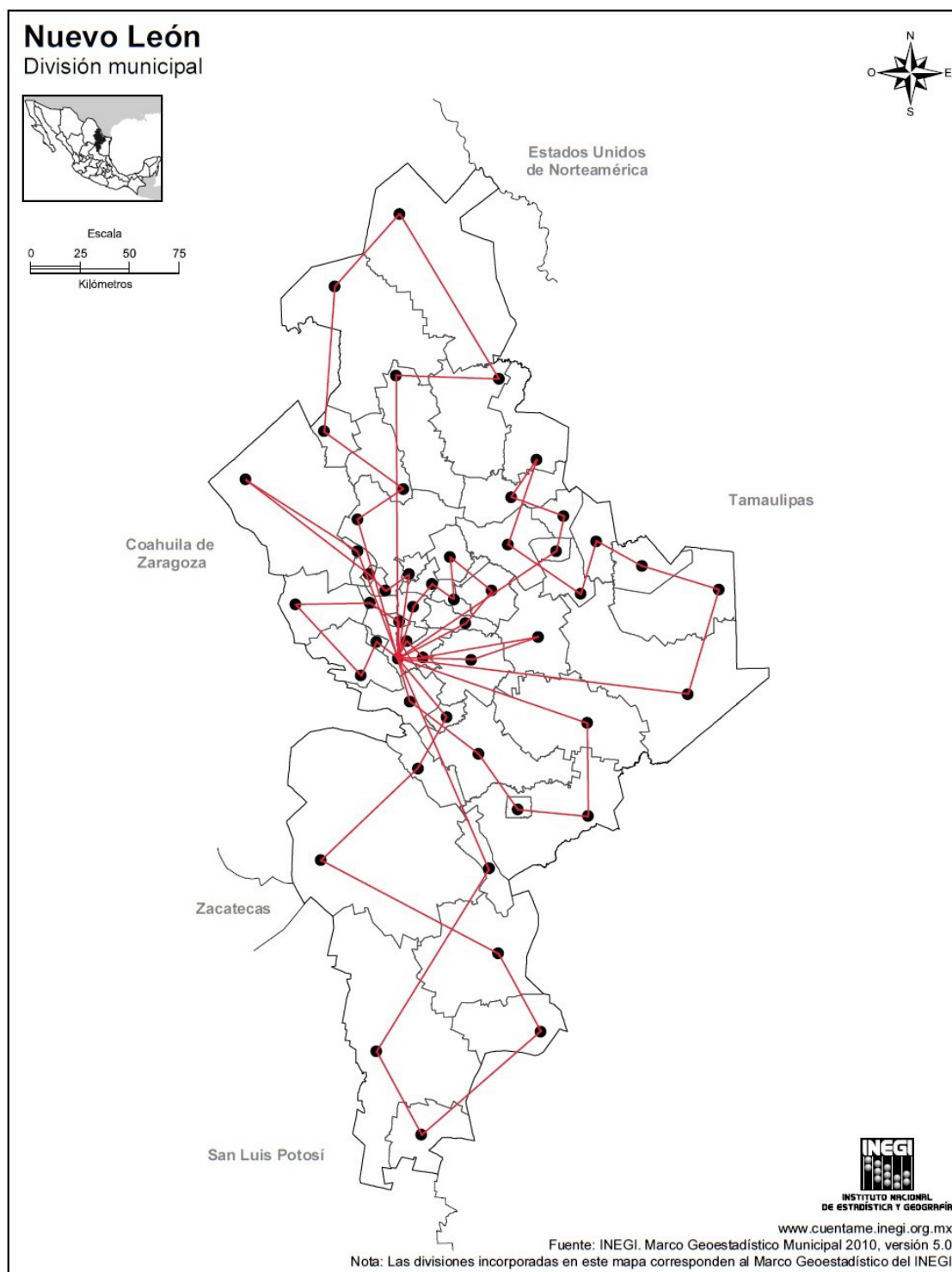


Figura 4.1: Resultados del EPRP en la instancia real, primera solución

- Monterrey, Santiago, Montemorelos, Hualahuises, Linares, Hidalgo, Mina y Monterrey.

- Monterrey, San Pedro Garza García, General Terán, Pesquería, Abasolo, Carmen, García, General Escobedo y Monterrey.

- Monterrey, Guadalupe, Juárez, Los Ramones, Cadereyta, Doctor Gonzalez, Santa Catarina y Monterrey.

- Monterrey, Salinas Victoria, Villaldama, Bustamante, Lampazos de Naranjo, Anáhuac, Vallecillo, Sabinas Hidalgo, Apodaca y Monterrey.

- Monterrey, San Nicolás de los Garza, Ciénega de Flores, General Zuazua, Marín, Higuera y Monterrey.

La representación gráfica de como quedaron asignadas las rutas se puede ver en la figura 4.2.

En la tercera experimentación en la cual se disminuyo un poco más el peso de la función emisiones pero se conservo el de la función costos, de forma que está este equilibrada, se observa que nuevamente tenemos 8 rutas y que también existen cambios en el orden de los clientes a visitar. El GAP para esta solución fue de 1.3979 %. Las rutas obtenidas para esta solución se muestran a continuación:

- Monterrey, Apodaca, Pesquería, Doctor Gonzalez, Melchor Ocampo, General Treviño, Agualeguas, Parás, Cerralvo, Los Ramones y Monterrey.

- Monterrey, Los Herreras, Los Aldamas, Doctor Coss, General Bravo, China, General Terán, Linares, Hualahuises, Montemorelos y Monterrey.

- Monterrey, Santiago y Monterrey.

- Monterrey, Santa Catarina, San Pedro Garza García, Guadalupe, Juárez, Cadereyta y Monterrey.

- Monterrey, Allende, Rayones, Galeana, Doctor Arroyo, Mier y Noriega, Ge-

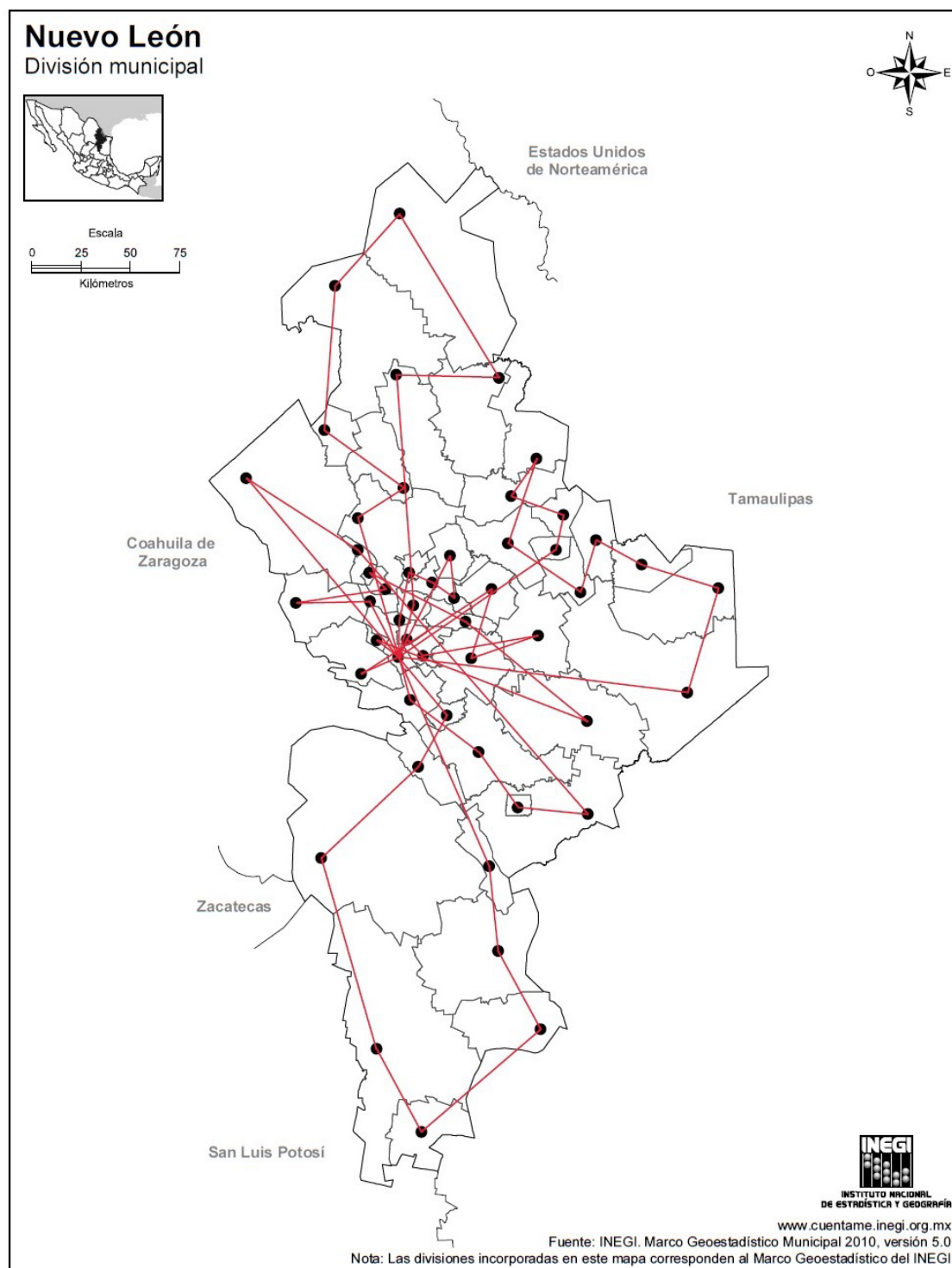


Figura 4.2: Resultados del EPRP en la instancia real, segunda solución

neral Zaragoza, Aramberri, Iturbide y Monterrey.

- Monterrey, Hidalgo, Mina, Abasolo, Carmen, García, General Escobedo y Monterrey.

- Monterrey, San Nicolás de los Garza, Ciénega de Flores, General Zuazua, Marín, Higuera y Monterrey.

- Monterrey, Salinas Victoria, Villaldama, Bustamante, Lampazos de Naranjo, Anáhuac, Vallecillo, Sabinas Hidalgo y Monterrey.

La representación gráfica de como quedaron asignadas las rutas se puede ver en la figura 4.3.

En la cuarta experimentación en la cual se disminuyo un poco más el peso de la función emisiones pero se conservo el de la función costos, de forma que el modelo de un poco mas de prioridad a la reducción de costos que a la reducción de emisiones. Podemos observar que nuevamente tenemos 8 rutas y que también existen cambios en el orden de los clientes a visitar. El GAP para esta solución fue de 7.0955 %. Las rutas obtenidas para esta solución se muestran a continuación:

- Monterrey, San Pedro Garza García, Santa Catarina y Monterrey.

- Monterrey, Los Herreras, Los Aldamas, Doctor Coss, General Bravo, China, Juárez, Guadalupe y Monterrey.

- Monterrey, Salinas Victoria, Villaldama, Bustamante, Lampazos de Naranjo, Anáhuac, Vallecillo, Sabinas Hidalgo y Monterrey.

- Monterrey, San Nicolás de los Garza, Ciénega de Flores, General Zuazua, Marín, Higuera y Monterrey.

- Monterrey, Hidalgo, Mina, Abasolo, Carmen, García, General Escobedo y Monterrey.

- Monterrey, Allende, Rayones, Galeana, Doctor Arroyo, Mier y Noriega, Ge-

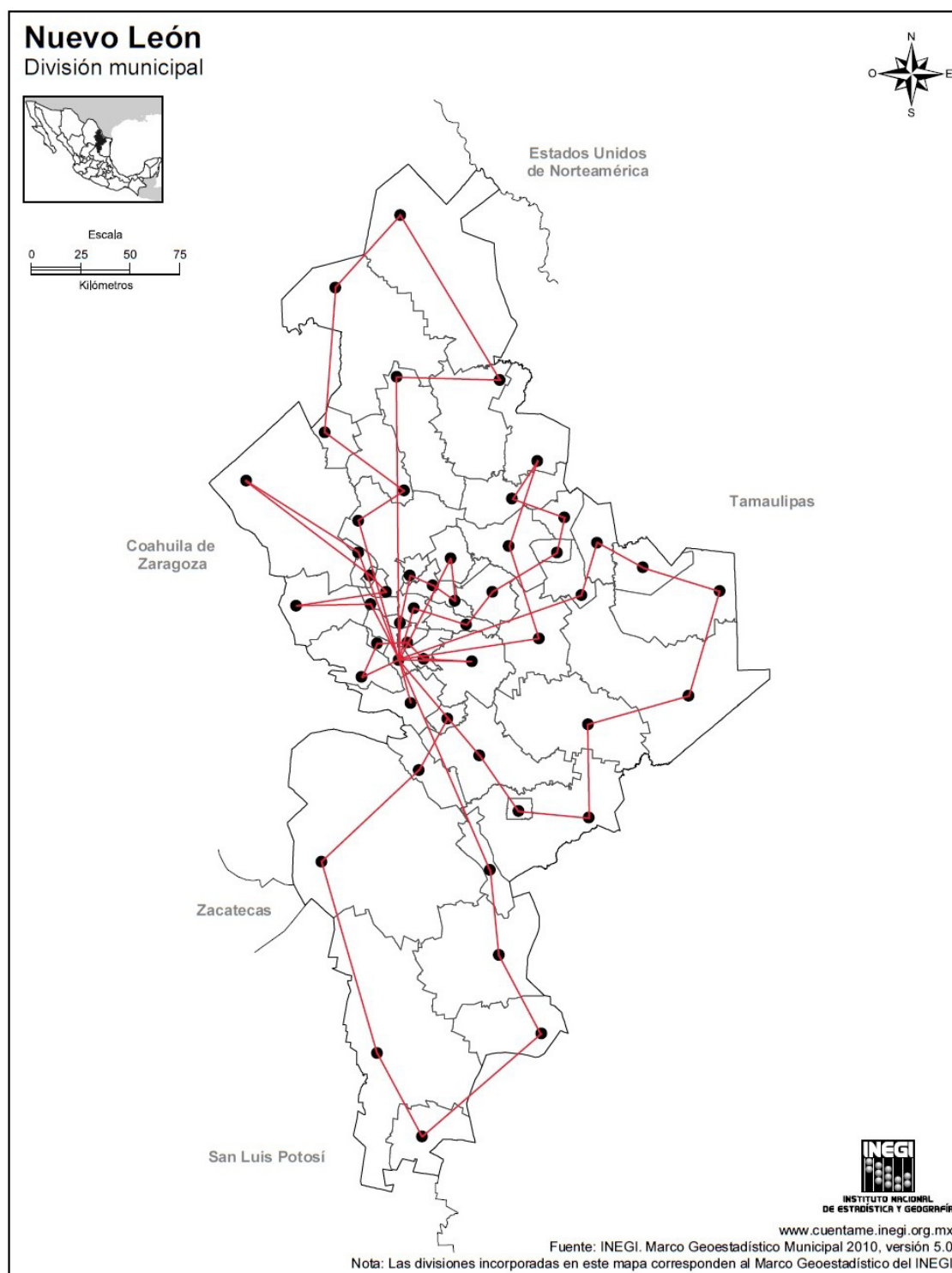


Figura 4.3: Resultados del EPRP en la instancia real, tercera solución

neral Zaragoza, Aramberri, Iturbide y Monterrey.

- Monterrey, Apodaca, Pesquería, Doctor Gonzalez, Melchor Ocampo, General Treviño, Agualeguas, Parás, Cerralvo, Los Ramones y Monterrey.

- Monterrey, Cadereyta, Linares, Hualahuises, Montemorelos, General Terán, Santiago y Monterrey.

La representación gráfica de como quedaron asignadas las rutas se puede ver en la figura 4.4.

En la quinta experimentación en la cual se disminuyo en casi un 80 % el peso de la función emisiones pero se conservo el de la función costos, de forma que el modelo da mayor prioridad a la reducción de costos que a la reducción de emisiones. Podemos observar que nuevamente tenemos 8 rutas y que también existen cambios en el orden de los clientes a visitar. El GAP para esta solución fue de 11.9443 %. Las rutas obtenidas para esta solución se muestran a continuación:

- Monterrey, Allende, Rayones, Galeana, Doctor Arroyo, Mier y Noriega, General Zaragoza, Aramberri, Iturbide y Monterrey.

- Monterrey, Apodaca, Pesquería, Cerralvo, Agualeguas, Parás, General Treviño, Melchor Ocampo, Doctor Gonzalez, Guadalupe, Monterrey.

- Monterrey, San Pedro Garza García, Santa Catarina y Monterrey.

- Monterrey, Santiago, General Terán, Linares, Hualahuises, Montemorelos y Monterrey.

- Monterrey, Juárez, Los Ramones, China, General Bravo, Doctor Coss, Los Aldamas, Los Herreras, Cadereyta y Monterrey.

- Monterrey, Salinas Victoria, Villaldama, Bustamante, Lampazos de Naranjo, Anáhuac, Vallecillo, Sabinas Hidalgo y Monterrey.

- Monterrey, San Nicolás de los Garza, Ciénega de Flores, General Zuazua,

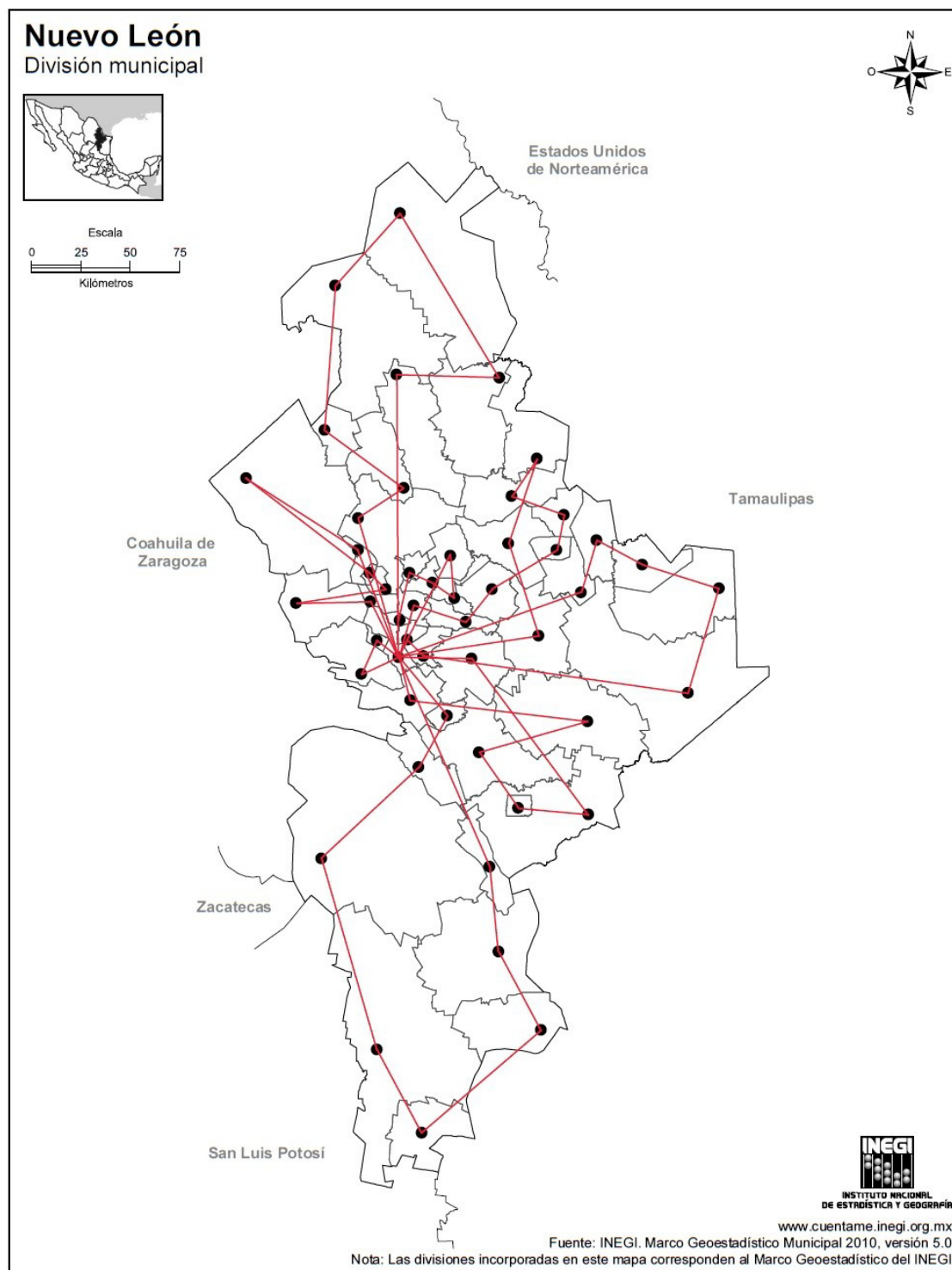


Figura 4.4: Resultados del EPRP en la instancia real, cuarta solución

Marín, Higuera y Monterrey.

- Monterrey, Hidalgo, Mina, Abasolo, Carmen, García, General Escobedo y Monterrey.

La representación gráfica de como quedaron asignadas las rutas se puede ver en la figura 4.5.

En la sexta experimentación se disminuyo en cerca del 99 % el peso de la función emisiones pero se conservo el de la función costos, de forma que el modelo da mayor prioridad a la reducción de costos que a la reducción de emisiones. Podemos observar que nuevamente tenemos 8 rutas y que también existen cambios en el orden de los clientes a visitar. El GAP para esta solución fue de 12.8302 %. Las rutas obtenidas para esta solución se muestran a continuación:

- Monterrey, Allende, Rayones, Galeana, Doctor Arroyo, Mier y Noriega, General Zaragoza, Aramberri, Iturbide y Monterrey.

- Monterrey, Apodaca, Pesquería, Doctor Gonzalez, Cadereyta, Los Ramones, Juárez, Guadalupe y Monterrey.

- Monterrey, Santiago, General Terán, Linares, Hualahuises, Montemorelos y Monterrey.

- Monterrey, Santa Catarina, San Pedro Garza García y Monterrey.

- Monterrey, General Escobedo, García, Carmen, Abasolo, Mina, Hidalgo y Monterrey.

- Monterrey, Melchor Ocampo, General Treviño, Agualeguas, Parás, Cerralvo, Los Herreras, Los Aldamas, Doctor Coss, General Bravo, China y Monterrey.

- Monterrey, Salinas Victoria, Villaldama, Bustamante, Lampazos de Naranjo, Anáhuac, Vallecillo, Sabinas Hidalgo y Monterrey.

- Monterrey, San Nicolás de los Garza, Ciénega de Flores, General Zuazua,

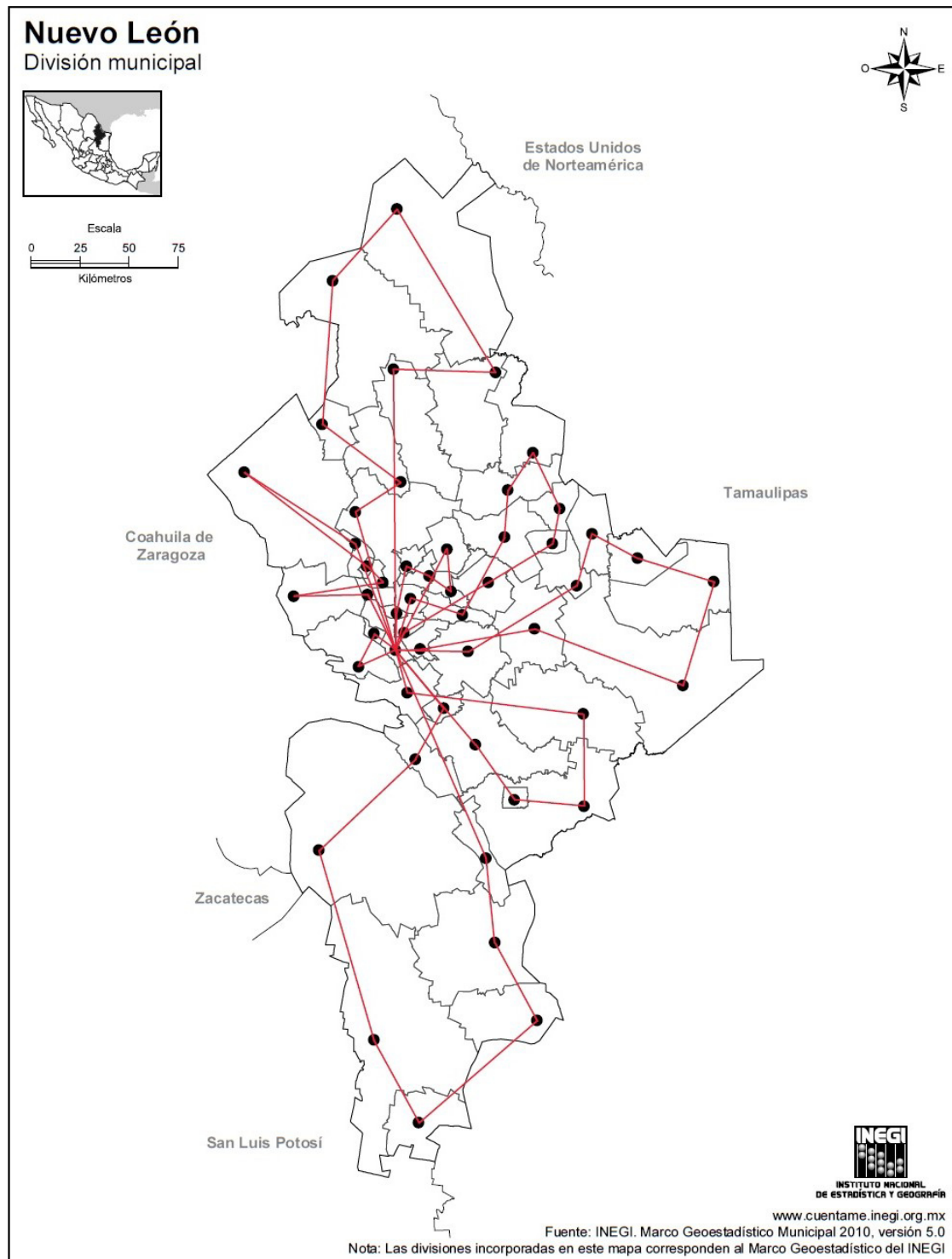


Figura 4.5: Resultados del EPRP en la instancia real, quinta solución

Marín, Higuera y Monterrey.

La representación gráfica de como quedaron asignadas las rutas se puede ver en la figura 4.6.

En base a esta última etapa de experimentación donde se compararon las soluciones de la misma instancia bajo diferentes escenarios se puede aseverar que dependiendo de los intereses de una organización, la solución que se obtenga se vera afectada directamente, una solución que reduzca costos operativos incrementara las emisiones de la solución, en contraparte, una solución que reduzca las emisiones principalmente seguramente incrementara en alguna proporción los costos operativos.

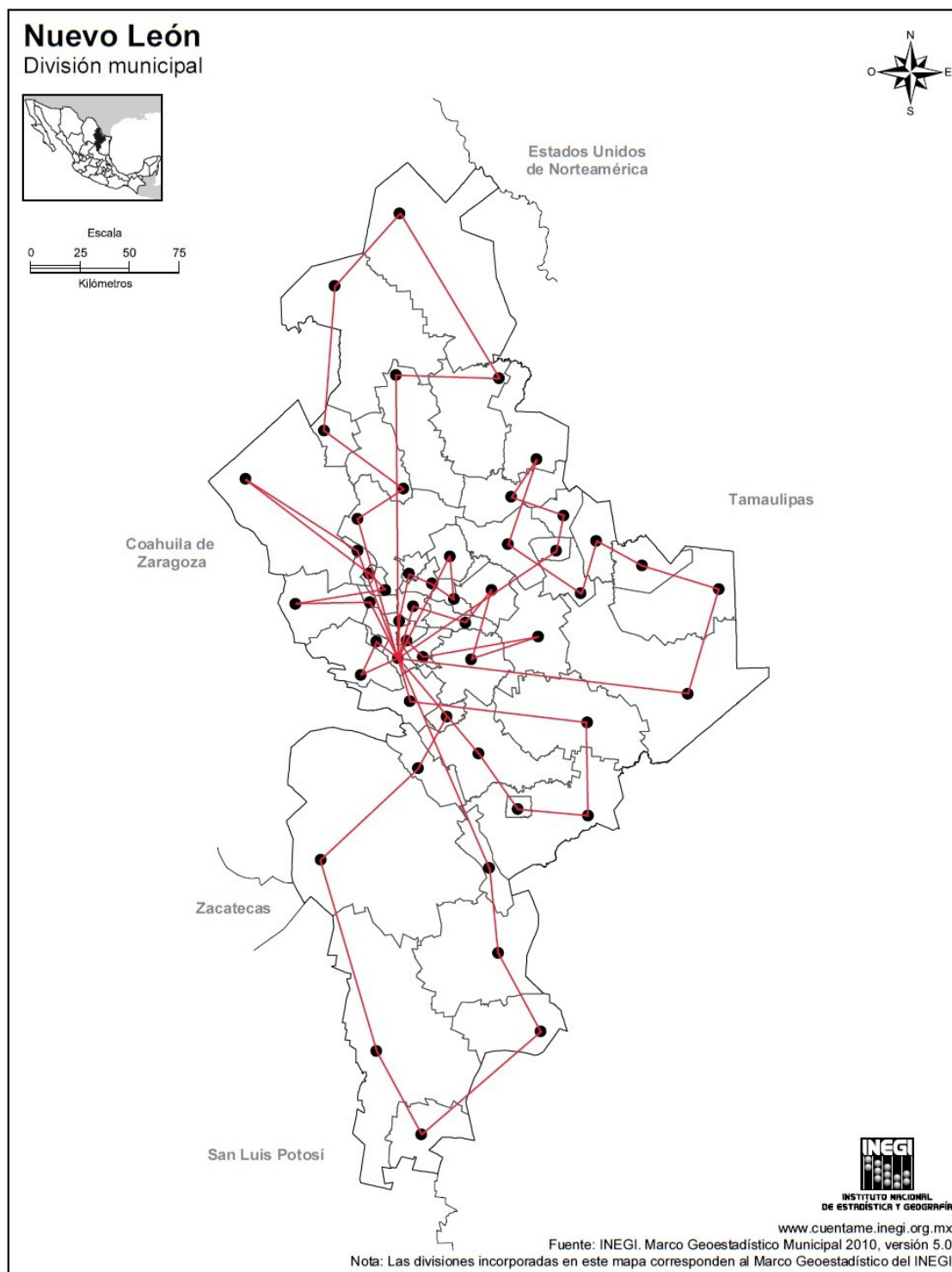


Figura 4.6: Resultados del EPRP en la instancia real, sexta solución

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES

El problema de optimización que trabajamos en este proyecto nos ha permitido visualizar como en la medida que se modifique la importancia de nuestros objetivos también existirán cambios en la programación de las rutas de distribución que sean utilizadas para cumplir con las demandas de los clientes. Algunos de los hallazgos más importantes que se encontraron al concluir la experimentación son los siguientes:

- Una sola velocidad promedio tiene gran impacto en la solución que arroja nuestro EPRP, esto en comparación con las tres velocidades que se utilizan en la experimentación con el modelo de Demir, Bektas y Laporte [41]. Bajo este enfoque, es fácil comprender el porqué la velocidad será uno de los factores que más impacten en el consumo de combustible y por ende en la generación de emisiones como planteaban algunos autores.
- La convergencia del solver tiene una gran sensibilidad a los parámetros de la función objetivo, si se modifican los pesos de estos valores puede ganarse o perderse capacidad de respuesta al buscar una solución en GAMS.
- Se pueden considerar una gran diversidad de factores que inciden en el consumo de combustible para establecer una medida de emisiones, todo dependerá de lo complejo que sea el problema a resolver y que tan alcanzable sea el modelar las condiciones del problema que se busquen incluir.

El modelo que hemos desarrollado en este trabajo es fácilmente adaptable a cualquier caso que cumpla con las características bajo las cuales se trabajó en este problema, sus parámetros solo deberán ser modificados e ingresar los datos requeridos.

Una herramienta como esta puede ser de mucha utilidad para entornos a nivel operacional y táctico donde se busque la eficiencia en el consumo de recursos, y de manera específica el reducir no solo los costos operativos sino los costos de combustible.

El modelo puede ayudar a las organizaciones a observar cómo podrían comportarse estos beneficios en sus operaciones actuales si deciden trabajar con un enfoque como el propuesto, el cual no solo busca reducir los costos, sino que también busca como objetivo primordial el reducir las emisiones contaminantes de CO_2 a la atmósfera y a si contribuir al cuidado del medio ambiente dentro de las operaciones logísticas.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] «Council of Supply Chain Management Professionals», <https://cscmp.org/iMIS0/CSCMP/>.
- [2] SRIVASTAVA, S., «Green supply-chain management: A state-of-the-art literature review», *International Journal of Management Reviews, British Academy of Management*, **9**(1), págs. 53–80, 2007.
- [3] «Intergovernmental Panel on Climate Change.» *Working Group III Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Mitigation of Climate Change*, 2014.
- [4] «International Energy Agency (IEA).» *CO₂ Emissions from Fuel Combustion, Organization for Economic Cooperation and Development*, 2015.
- [5] TOTH, P. y VIGO, D., «The vehicle routing problem», *Society for Industrial and Applied Mathematics Philadelphia*, USA, 2001.
- [6] LAPORTE, G., «What you should know about the vehicle routing problem», *Naval Research Logistics*, **8**, págs. 811–819, 2007.
- [7] DANTZIG, G. B. y RAMSER, J. H., «The Truck Dispatching Problem», *Management Science*, **6**(1), págs. 80–91, 1959.
- [8] CORDEAU, J., LAPORTE, G., SAVELSBERGH, M. y VIGO, D., «Chapter 6 Vehicle Routing», *Handbooks in Operations Research and Management Science*, vol: 14, **8**, págs. 367–428, 2007.

-
- [9] SUREKHA, P. y SUMATHI, S., «Solution To Multi-Depot Vehicle Routing Problem Using Genetic Algorithms», *World Applied Programming*, págs. 118–131, 2011.
- [10] MALANDRAKI, C. y DASKIN, M., «Time dependent vehicle routing problems: Formulations, properties and heuristic algorithms», *Transportation Science*, págs. 185–200, 1992.
- [11] CHRISTIE, J. y SATIR, S., «Saving Our Energy Sources and Meeting Kyoto Emission Reduction Targets While Minimizing Costs with Application of Vehicle Logistics Optimization.», *Sustainable Transportation Implementation, Performance and Results Session of the 2006 Annual Conference of the Transportation Association of Canada Charlottetown*, 2006.
- [12] KARA, I., KARA, B. y YETIS, M., «Energy Minimizing Vehicle Routing Problem», *Lecture Notes in Computer Science*, págs. 62–71, 2007.
- [13] ANDREW, P., «The Development of an Integrated Routing and Carbon Dioxide Emissions Model for Goods Vehicles», *PhD Thesis. Cranfield University*, 2007.
- [14] HSU, C., HUNG, S. y LI, H., «Vehicle routing problem with time-windows for perishable food delivery», *Journal of Food Engineering*, **80**(2), págs. 465–475, 2007.
- [15] YONG, P. y XIAOFENG, W., «Research on a Vehicle Routing Schedule to Reduce Fuel Consumption», *International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*, págs. 825–827, 2009.
- [16] MADEN, W., EGGLESE, R. y BLACK, D., «Vehicle routing and scheduling with time varying data: A case study», *Journal of the Operational Research Society*, págs. 515–522, 2009.
- [17] FIGLIOZZI, M., «Emissions Minimization Vehicle Routing Problem», *Submitted to the 89th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Portland State University, USA, 2010.

-
- [18] KUO, Y., «Using simulated annealing to minimize fuel consumption for the time dependent vehicle routing problem», *Computers & Industrial Engineering*, págs. 157–165, 2010.
- [19] BEKTAŞ, T. y LAPORTE, G., «The pollution-routing problem», *Research Part B: Methodological*, págs. 1232–1250, 2011.
- [20] SUZUKI, Y., «A new truck-routing approach for reducing fuel consumption and pollutants emission», *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, págs. 73–77, 2011.
- [21] XIAO, Y., ZHAO, Q., KAKU, I. y XU, Y., «Development of a fuel consumption optimization model for the capacitated vehicle routing problem», *Computers & Operations Research*, págs. 1419–1431, 2011.
- [22] ERDOGAN, S. y MILLER-HOOKS, E., «A Green Vehicle Routing Problem», *Transportation Research Part E*, págs. 100–114, 2012.
- [23] KÜÇÜKOĞLU, İ., ENE, S., AKSOY, A. y ÖZTÜRK, N., «A Green capacitated vehicle routing problem with fuel consumption optimization model», *International Journal of Computational Engineering Research*, págs. 16–23, 2013.
- [24] SOYSAL, M., BLOEMHOF-RUWAARD, J. y BEKTAŞ, T., «The time-dependent two-echelon capacitated vehicle routing problem with environmental considerations», *International Journal Production Economics*, págs. 366–378, 2014.
- [25] ZHANG, Z., WEI, L. y LIM, A., «An evolutionary local search for the capacitated vehicle routing problem minimizing fuel consumption under three-dimensional loading constraints», *Transportation Research Part B*, págs. 20–35, 2015.
- [26] ZHANG, J., ZHAO, Y., XUE, W. y LI, J., «Vehicle routing problem with fuel consumption and carbon emission», *International Journal Production Economics*, págs. 234–242, 2015.

-
- [27] DEMIR, E., BEKTAŞ, T. y LAPORTE, G., «A review of recent research on green road freight transportation», *European Journal of Operational Research*, págs. 775–793, 2014.
- [28] EGGLESE, R. y BLACK, D., «Optimizing the routing of vehicles», *Green Logistics: Improving the environmental sustainability of logistics*, págs. 215–228, 2010.
- [29] DEMIR, E., BEKTAŞ, T. y LAPORTE, G., «A comparative analysis of several vehicle emission models for road freight transportation», *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, págs. 347–357, 2011.
- [30] DEMIR, E., BEKTAŞ, T. y LAPORTE, G., «An adaptive large neighborhood search heuristic for the pollution-routing problem», *European Journal of Operational Research*, págs. 346–359, 2012.
- [31] VAN WOENSEL, T., CRETEN, R. y VANDAELE, N., «Managing the environmental externalities of traffic logistics: The issue of emissions», *Production and Operations Management*, págs. 207–223, 2001.
- [32] CAT, «Tractor-trailer performance guide. Technical report», *Technologies and approaches to reducing the fuel consumption of medium- and heavy-duty vehicles*, 2006.
- [33] BALDACCI, R. y MINGOZZI, A., «A unified exact method for solving different classes of vehicle routing problems», *Mathematical Programming Series A and B*, págs. 347–380, 2009.
- [34] TOTH, P. y VIGO, D., «Models, relaxations and exact approaches for the capacitated vehicle routing problem», *Discrete Applied Mathematics*, págs. 487–512, 2000.
- [35] KONTORAVDIS, G. y BARD, J., «A GRASP for the Vehicle Routing Problem with Time Windows», *ORSA Journal on Computing*, págs. 10–23, 1995.

-
- [36] OLAFSSON, S., «Metaheuristics, Chapter 21», *Handbooks in Operations Research and Management Science: Simulation*, North-Holland, 2006.
- [37] MARLER, R. y ARORA, J., «Survey of multi-objective optimization methods for engineering», *Struct Multidisc Optim*, págs. 369–395, 2004.
- [38] ARANDA, J. y ORJUELA, J., «Optimización multiobjetivo en la gestión de cadenas de suministro de biocombustibles. Una revisión de la literatura», *Facultad de Ingeniería de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas*, Bogotá, Colombia, 2015.
- [39] KALYANMOY, D., PRATAP, A. y AGARWAL, S., « A Fast and Elitist Multi-objective Genetic Algorithm: NSGA-II », *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* , **6**(2), págs. 182–197, 2002.
- [40] BEKTAŞ, T. y LAPORTE, G., «The Pollution-Routing Problem», *Transportation Research Part B: Methodological*, **45**(8), págs. 1232–1250, 2011.
- [41] DEMIR, E., BEKTAŞ, T. y LAPORTE, G., «The bi-objective Pollution-Routing Problem», *European Journal of Operational Research*, págs. 464–478, 2014.
- [42] «Traza tu ruta, Secretaría de Comunicaciones y Transportes», <http://app.sct.gob.mx/>.

RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO

José Roberto Vásquez Ruiz

Candidato para obtener el grado de
Maestría en Logística y Cadena de Suministro

Universidad Autónoma de Nuevo León
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Tesis:

PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN DE CONSUMO DE COMBUSTIBLE EN
LAS RUTAS DE TRANSPORTE TERRESTRE DE MERCANCÍAS

Hijo de Merced Ruiz López, nacido el 15 de septiembre de 1991 en Oaxaca de Juárez, Oaxaca, México. Titulado como Ingeniero Industrial por el Instituto Tecnológico de Oaxaca, actualmente cursa el posgrado de Logística y Cadena de Suministro en la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León, becado por el Consejo de Ciencia y Tecnología (CONACYT), dicho posgrado se encuentra dentro del Programa Nacional de Posgrados de Calidad (PNPC).